

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mario Liber

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Mario Liber

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću, te asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Također zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Mario Liber



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mario Liber**

Mat. br.:0035197341

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**OPTIMIZACIJA PARAMETARA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU
LEGURE Al-Mg ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**PARAMETER OPTIMIZATION FOR WIRE AND ARC ADDITIVE
MANUFACTURING OF Al-Mg ALLOY**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je opisati aditivnu proizvodnju aluminijskih legura električnim lukom i žicom te navesti primjere praktične primjene. Detaljno analizirati aluminijsku leguru AlMg s posebnim naglaskom na zavarljivost. Opisati MIG postupak zavarivanja i navesti specifičnosti opreme za MIG zavarivanje aluminijskih legura.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je odrediti optimalnu tehnologiju aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom za aluminijsku leguru AlMg. Također, ispitati utjecaj određenih parametara na stabilnost procesa, produktivnost i geometrijske značajke slojeva. Na dobivenim uzorcima provesti ispitivanje makrostrukture te analizirati eventualne nepravilnosti. Konačno, analizirati dobivene podatke i donijeti zaključke o primjenjivosti aluminijske legure AlMg za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ilica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
2. ALUMINIJ I ALUMINIJEVE LEGURE.....	2
2.1. Povijest otkrića aluminijske legure.....	2
2.2. Proizvodnja aluminijske legure.....	3
2.3. Svojstva i primjena aluminijske legure.....	6
2.4. Podjela aluminijskih legura.....	7
2.4.1. Lijevene legure.....	7
2.4.2. Gnječene legure.....	8
2.5. Označivanje aluminijskih legura.....	9
2.5.1. Označivanje lijevanih aluminijskih legura.....	9
2.5.2. Označivanje gnječenih aluminijskih legura.....	11
2.6. Aluminijska legura EN AW 5xxx (AlMg).....	14
2.7. Zavarljivost aluminijske legure.....	16
2.7.1. Utjecaj svojstava aluminijske legure na zavarljivost.....	19
2.7.1.1. Utjecaj toplote na zavarivanje aluminijskih legura.....	20
2.7.2. Nepravilnosti u zavaru aluminijske legure i aluminijskih legura.....	23
2.7.2.1. Poroznost.....	24
2.7.2.2. Tople pukotine.....	24
2.7.3. Odabir dodatnog materijala kod zavarivanja Al i Al-legura.....	27
3. ZAVARIVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA.....	29
3.1. MIG zavarivanje aluminijskih legura.....	29
3.2. Specifičnosti opreme MIG zavarivanja aluminijskih legura.....	30
3.2.1. Izvor struje.....	31
3.2.2. Pogonski sustav žice.....	32
3.2.3. Zaštitni plinovi.....	34
3.2.4. Tehnike rada i nagib pištolja za zavarivanje.....	36

3.3. Aditivna proizvodnja aluminijevih legura električnim lukom i žicom (WAAM).....	37
3.3.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (WAAM).....	39
3.3.2. Prednosti i nedostaci WAAM postupka.....	41
3.3.3. Materijali kod WAAM postupka	43
3.3.4. Primjena WAAM postupka.....	45
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	47
4.1. Oprema za zavarivanje.....	47
4.2. Odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina.....	49
4.3. Parametri zavarivanja.....	51
4.4 Tijek izrade aluminijevih zidova WAAM postupkom.....	55
4.5. Priprema i izrada ispitnih uzoraka.....	59
4.6. Mjerenje tvrdoće.....	62
5. ZAKLJUČAK.....	64
LITERATURA.....	66

POPIS SLIKA

Slika 1. Ruda boksit [1].....	3
Slika 2. Uređaj za elektrolizu glinice [1].....	4
Slika 3. Uporaba aluminija i njegovih legura [5,6].....	6
Slika 4. Čimbenici koji utječu na zavarljivost [16].....	16
Slika 5. Oksidni sloj "zarobljen" unutar zavara [13].....	17
Slika 6. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline kod MIG-a i TIG-a [13].....	18
Slika 7. Omekšanje na mjestu zavarenog spoja [13].....	20
Slika 8. Primjer naljepljivanja aluminijske legure [20].....	21
Slika 9. Temperature predgrijavanja aluminijskih legura [19].....	22
Slika 10. Poroznost u sučeljenom spoju aluminija (TIG) [13].....	23
Slika 11. Tople pukotine [13].....	24
Slika 12. Shematski prikaz mehanizma nastajanja toplih pukotina [22].....	25
Slika 13. Utjecaj legirajućih elemenata na osjetljivost toplih pukotina [23].....	26
Slika 14. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi [26].....	29
Slika 15. Shema uređaja za zavarivanje MIG/MAG [27].....	30
Slika 16. Dijagram struje i napona, CV [28].....	31
Slika 17. Push sustav [30].....	32
Slika 18. Push – Pull sustav [30].....	33
Slika 19. Posljedice pozicije elektrode i tehnike rada [25].....	36
Slika 20. Podjela postupaka aditivne proizvodnje [34].....	38
Slika 21. Robot za zavarivanje sa šest SSG i CNC portalni stroj [34].....	39
Slika 22. Dodatna oprema za WAAM [36].....	40
Slika 23. Prednost WAAM postupka [35].....	41
Slika 24. Primjene WAAM postupka [35].....	46
Slika 25. Robotska stanica Almega OTC AX V6.....	48
Slika 26. Privjesak za učenje.....	48
Slika 27. Pozicioniranje i stezanje osnovne ploče.....	48
Slika 28. Zaštitni plin – Argon 4.8 i protok zaštitnog plina.....	50
Slika 29. Nepravilnost zavara nastala uslijed nepravilnog dovoda žice.....	55
Slika 30. Nepravilnost zavara pri izradi zida 1.....	55

Slika 31. Tijek izrade prvog zida – pogled sprijeda i s boka.....	56
Slika 32. Novi problemi uzrokovani oštećenjem bužira.....	56
Slika 33. Nastavak izrade prvog zida nakon brušenja oštećenih slojeva.....	57
Slika 34. Izrađen zid 1. – pogled sprijeda i s boka.....	57
Slika 35. Prvi prolaz drugog zida.....	58
Slika 36. Izrađen zid 2. – pogled sprijeda i s boka.....	58
Slika 37. Odvajanje izrađenih zidova od osnovne ploče plazma rezačicom.....	59
Slika 38. Uzorci izrezani tračnom pilom uz ostatak izrađenih zidova.....	59
Slika 39. Brusni papiri različite zrnatosti i ručno izbrušeni uzorak 1.....	60
Slika 40. Uređaj za fino poliranje – Phoenix Alpha Grinder Polisher.....	61
Slika 41. Nagrizanje uzoraka.....	61
Slika 42. Makroizbrusak uzorka 1.....	61
Slika 43. Makroizbrusak uzorka 2.....	61
Slika 44. Područja mjerenja tvrdoće uzorka 1.....	62
Slika 45. Područja mjerenja tvrdoće uzorka 2.....	62
Slika 46. Tvrdoća HV5 oba uzorka.....	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure [4].....	6
Tablica 2. Osnovna svojstva lijevanih aluminijskih legura [4,9].....	7
Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječanih aluminijskih legura [4,10].....	8
Tablica 4. Grupe lijevanih aluminijskih legura prema SAE [10,11].....	10
Tablica 5. Oznake toplinskih stanja lijevanih legura – EN 1706 [11].....	10
Tablica 6. Numeričke oznake gnječanih legura aluminijske [10,11].....	11
Tablica 7. Stanje toplinske obrade gnječanih legura [11,13].....	13
Tablica 8. Mehanička svojstva AlMg legura [14].....	15
Tablica 9. Vrijednosti temperature i vremena predgrijavanja [19].....	22
Tablica 10. Preporučeni dodatni materijal za zavarivanje aluminijske [21].....	28
Tablica 11. Utjecaj Ar i He na zavar [31].....	35
Tablica 12. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje [33].....	38
Tablica 13. Materijali koji se koriste kod WAAM postupka [37].....	43
Tablica 14. Karakteristike izvora struje DP 400 [38].....	49
Tablica 15. Orijentacijski kemijski sastav metala zavara uporabom AlMg5 žice [39].....	49
Tablica 16. Mehanička svojstva čistog metala zavara uporabom AlMg5 žice [39].....	49
Tablica 17. Parametri zavarivanja i dimenzije zida 1 nakon svakog prolaza.....	53
Tablica 18. Parametri zavarivanja i dimenzije zida 2 nakon svakog prolaza.....	54
Tablica 19. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV5.....	63

POPIS KRATICA

Al	Aluminij
Mg	Magnezij
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnog plina
AM	Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing)
WAAM	Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing)
WLAM	Aditivna proizvodnja žicom i laserom (engl. Wire and Laser Additive Manufacturing)
Na_3AlF_6	Kriolit
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	Boksit
$\text{AlO}(\text{OH})$	Bemit
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Hidrargilit
FCC	Plošno centrirana jedinična ćelija (engl. Face Centered Cubic)
Ar	Argon
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. American Society for Testing and Materials)
CNC	Računalom numerički upravljani strojevi (engl. Computer Numerical Control)
BTW	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (engl. Buy to Fly)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (engl. Computer Aided Design)
EBF	Aditivna proizvodnja žicom i elektronskom zrakom (engl. Electron Beam Freeform Fabrication)
EBM	Taljenje pomoću snopa elektrona (engl. Electron Beam Melting)
HV 5	Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom
Mn	Mangan
Mo	Molibden
RM	Brza proizvodnja (engl. Rapid Manufacturing)
RP	Brza izrada prototipova (engl. Rapid Prototyping)
RT	Brza izrada alata (engl. Rapid Tooling)
Si	Silicij
SLM	Selektivno lasersko taljenje (engl. Selective Laser Melting)
STL	STL datoteka (engl. Standard Tessellation Language)
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu opisana su svojstva aluminijske legure, osnovna podjela i klasifikacija aluminijskih legura. Detaljno je objašnjena aluminijska legura Al-Mg s posebnim osvrtom na zavarljivost i nepravilnosti koje se pojavljuju tijekom njenog zavarivanja. Opisan je MIG postupak zavarivanja koji se koristi u eksperimentalnom dijelu rada kod zavarivanja aluminijske legure. U posljednjem dijelu navedeni su primjeri praktične primjene i značaj aditivne proizvodnje.

U eksperimentalnom dijelu rada izrađen je zid aluminijske legure Al-Mg nanošenjem slojeva WAAM postupkom. Određena je optimalna tehnologija za Al-Mg leguru te su ispitani utjecaji određenih parametara na stabilnost procesa, produktivnost i geometrijske značajke slojeva. Na dobivenim uzorcima provedeno je ispitivanje makrostrukture i analizirane su nepravilnosti. Temeljem dobivenih rezultata eksperimentalnog rada donesen je zaključak o primjenjivosti aluminijske legure Al-Mg za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

Ključne riječi: aluminij, WAAM, MIG zavarivanje, zavarljivost aluminijskih legura

1. UVOD

Aluminij (Al) je metal koji je poslije kisika i silicija najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori gdje ga ima oko osam posto. U prirodi se ne nalazi u elementarnom stanju, već je rasprostranjen u raznim rudama i mineralima.

Tehnički aluminij relativno je male mase, ima dobra mehanička svojstva i korozijsku postojanost, no u praksi ga u većini slučajeva koristimo u legiranom stanju. Legiranjem mu se značajno poboljšavaju mehanička svojstva, prvenstveno vlačna čvrstoća i tvrdoća, a ponekad i krutost i udarni rad loma. Tako se aluminijske legure mogu pronaći u brojnim industrijskim granama: brodogradnji, građevini, svemirskoj, zrakoplovnoj, automobilskoj industriji i drugima. Razvojem civilizacije, znanja i tehnologija danas je poznat veliki broj različitih materijala i tehnologija kojima se ti materijali mogu spojiti. Međutim, problem predstavlja prevelika potražnja raznovrsnih materijala za čiju su proizvodnju potrebne velike količine energije te velika novčana sredstva za njihovo zbrinjavanje i očuvanje okoliša. Masovna proizvodnja i ne vođenje brige o nepovoljnim nusproduktima proizvodnje, kao što su štetni plinovi, doveli su do niza promjena u našem okolišu koja se očituju kroz razne klimatske, zdravstvene i druge probleme kojih još nismo ni svjesni u pravoj mjeri. Porastom osviještenosti populacije, opada trend masovne proizvodnje i industrija se okreće maloserijskoj i pojedinačnoj proizvodnji. Karakteristike te proizvodnje su: kraće vrijeme izrade, manji troškovi i manji gubitak materijala. Iz navedenih razloga razvijaju se i primjenjuju postupci aditivne proizvodnje (engl. *Additive Manufacturing*, AM). Glavna karakteristika tih postupaka je dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade konačnog proizvoda vrlo složene geometrije.

Jedan od sve prisutnijih postupaka aditivne proizvodnje metala je proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*, WAAM). Ovaj postupak koristi električni luk kao izvor energije, robota koji omogućuje automatsko gibanje pištolja za zavarivanje i različite manipulatore. Kao i kod svakog postupka zavarivanja, postoje nedostaci i kod WAAM-a zbog čega još uvijek nije široko primjenjiv u industriji, ali mogućnosti koje pruža u području zavarivanja, pogotovo aluminijevih i titanovih legura, ukazuju da će uskoro zamijeniti klasične načine izrade.

2. ALUMINIJ I ALUMINIJEVE LEGURE

2.1. Povijest otkrića aluminija

Aluminij je metal 13. skupine periodnog sustava elemenata. U prirodi ga nema u elementarnom stanju, već je vezan u raznim rudama i mineralima, kao što su boksit, razne gline, zeoliti i drugo. Iako najrasprostranjeniji metal u Zemljinoj kori, aluminij je otkriven tek početkom 19. stoljeća. Prvi ga je dobio u izoliranom elementarnom stanju danski fizičar Hans Christian Ørsted. Friedrich Wöhler nastavio je eksperimente i izolirao čisti aluminij dvije godine kasnije. Henri Sainte-Claire Deville i Robert Bunsen su 1854. godine električnom strujom po prvi puta uspjeli izdvojiti aluminij u većim količinama [1].

Na Svjetskoj izložbi u Parizu 1855. godine aluminij tzv. „srebro iz gline“, po prvi je put predstavljen široj publici kao dragocjeni predmet koji je u to vrijeme bio toliko rijedak da je bio skuplji od zlata. Devilleova metoda bila je nepogodna za proizvodnju velikih količina aluminija, pa su istraživanja nastavljena. Poul T. Heroult i Charles M. Hall 1866. godine otkrili su relativno jeftin postupak proizvodnje aluminija koji se temeljio na elektrolizi taline aluminijevih oksida (glinica) u kriolitu (Na_3AlF_6). To otkriće se smatra početkom primjene aluminija u industriji. Porastom proizvodnje aluminijski lim se počinje koristiti za krovove, posuđe, dijelove prvih aviona, automobila i drugo. Sljedeći korak u razvoju aluminija bilo je otkriće postupka za povećanje čvrstoće aluminijevih legura precipitacijskim očvršćivanjem. Time su poboljšana kemijska i fizička svojstva aluminija. Godine 1906. Alfred Wilm pronalazi leguru duraluminij koja dostiže čvrstoću čelika. Od 1918. otkrivene su i druge čvrste legure u toplom stanju primjerice Al-Cu-Mn, Al-Mg-Si, a kasnije i mnoge druge [2].

Postupci dobivanja i prerađivanja aluminija su se unaprijedili, a aluminij i njegove legure postaju jedan od glavnih konstrukcijskih materijala.

2.2. Proizvodnja aluminija

Komercijalna proizvodnja aluminija traje tek nešto više od 100 godina, dok se bakar, olovo i kositar upotrebljavaju već tisućama godina. Elementarni se aluminij ne može dobiti izravnom redukcijom s koksom (ugljikom) kao ostali metali jer je aluminij jače redukcijsko sredstvo od ugljika. Zbog navedenoga razloga dugo nije bilo moguće dobiti aluminij u većim količinama. Znatnije količine aluminija dobivene su tek šezdeset godina poslije njegovog otkrića, elektrolizom taline glinice u kriolitu [1].

Postupak proizvodnje aluminija sastoji se od dvije faze. U prvoj se fazi postupka dobiva glinica iz rude, a u drugoj elektrolizom taline glinice dobiva aluminij.

1. faza: Dobivanje glinice iz rude – Bayerov postupak

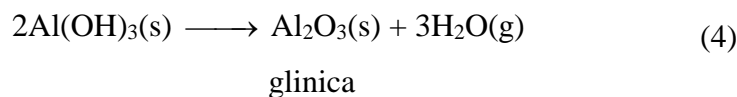
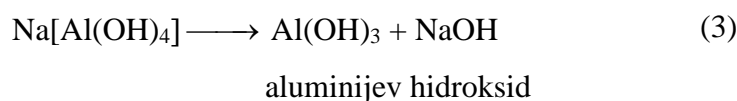
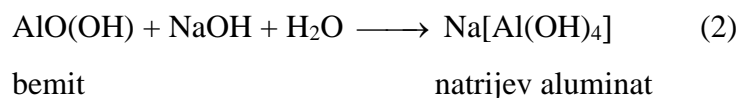
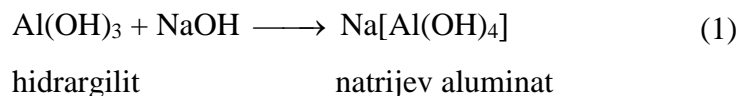
Najvažnija ruda za dobivanje aluminija je boksit, $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O})$, smjesa minerala bemita $\text{AlO}(\text{OH})$ i hidrargilita, $\text{Al}(\text{OH})_3$. Postupak dobivanja glinice iz boksita naziva se po izumitelju Bayerovim postupkom. Boksit (Slika 1) sadrži primjese minerala željeza, silicija, titanija i drugih. Zbog prisutnosti hidratiziranog željezova (III) oksida često ima crvenosmeđu boju [1].



Slika 1. Ruda boksit [1]

Ruda boksit se drobi, suši i melje u prah, koji se pomiješan s natrijevom lužinom kuha u čeličnom autoklavu pri temperaturi od 160 °C i povišenom tlaku [2].

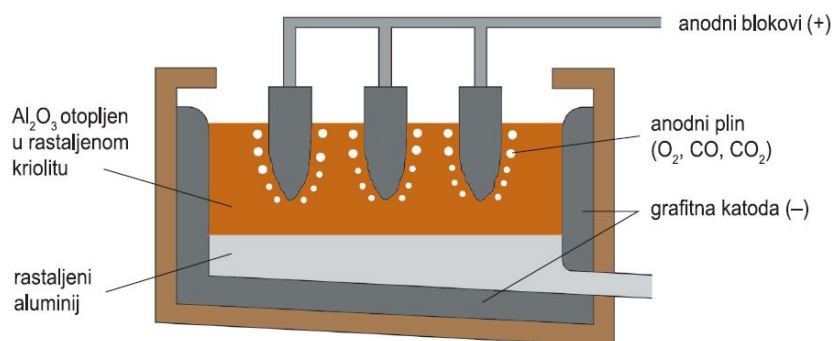
Bemit i hidrargilit reagiraju s lužinom (1, 2) i prelaze u topljivi natrijev aluminat [1].



Sve primjese rude ovim postupkom se istalože, aluminatna otopina se odvoji filtracijom, a iz filtrata kristalizira teško topljiv aluminijev hidroksid (3). Žarenjem aluminijeva hidroksida (4) u rotacijskim pećima na temperaturama iznad 1200 °C nastaje čista glinica, Al_2O_3 [1].

2. faza: Elektroliza taline glinice

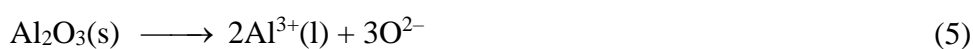
Čisti aluminij se proizvodi elektrolizom taline glinice (5). Talište glinice vrlo je visoko (oko 2000 °C), pa se ona otapa u rastaljenom kriolitu, Na_3AlF_6 koji snizi talište za skoro 1000 °C. U smjesi za elektrolizu maseni je udio glinice 5 – 7%, a talište smjese oko 950 °C. Time se postiže znatna ušteda energije. Elektroliza se provodi u željeznim posudama obloženim grafitom (Slika 2), koje se pune rastaljenom smjesom glinice i kriolita [1, 3].



Slika 2. Uređaj za elektrolizu glinice [1]

Grafitna obloga spojena je na negativni pol izvora istosmjerne struje i predstavlja katodu. Anodni blokovi od čistog ugljika urone se u talinu elektrolita. Na anodi se razvija kisik (6), koji zbog visoke temperature reagira s ugljikom anode dajući smjesu ugljikovih oksida (CO i CO₂). Dobivena smjesa naziva se anodni plin. Zbog navedenih reakcija anodni blokovi se troše i zamjenjuju novima. Na katodi se izluči sloj rastaljenog aluminija (7), čija je gustoća veća od gustoće taline, pa se skuplja na dnu kade za elektrolizu [1].

Jednadžbe elektrolize glinice [1]:



Rastaljeni se aluminij ispušta u kalupe. Čistoća aluminija veća je od 99%, a rafinacijom se može postići čistoća 99,99%. Iako se na taj način dobiva aluminij velike čistoće, proizvodnja ekonomski nije opravdana. Za dobivanje 1 tone aluminija potrebno je 4,5 tona boksita i pri tome se troši oko 0,5 tona ugljenih elektroda i oko 14 000 kWh električne energije. Zbog svojih svojstava i velike primjene velike količine različitog aluminijskog otpada predstavljaju ekološki problem. Recikliranjem aluminija najbolje se iskoristi otpad za proizvodnju novih količina metala. Pri proizvodnji recikliranog aluminija troši se oko 90 % manje energije nego kada se aluminij dobiva iz osnovnih sirovina (3000 do 5000 kWh). Takav pretaljeni aluminij naziva se sekundarni aluminij i pretežno se koristi za izradu odljevaka [2].

2.3. Svojstva i primjena aluminija

Aluminij je srebrnobijel, mekan, relativno krhak i sjajan metal. Lagan je, može se kovati, valjati i izvlačiti u tanke folije. Struktura jedinične ćelije aluminija je plošno centrirana (engl. *Face Centered Cubic*, FCC) i lako se oblikuje toplim i hladnim deformiranjem. Po plastičnosti je treći, a po kovnosti šesti od tehnički važnih metala. Dobar je vodič topline i električne struje. Zbog relativno negativnog redukcijskog potencijala otporan je na utjecaj korozivnih tvari: voda, dušična kiselina, neka organska otapala, atmosferski utjecaji i drugo. Uzrok postojanosti aluminija je stvaranje tankog oksidnog sloja na površini metala koji se ne ljušti i štiti aluminij od daljnje oksidacije. Otpornost prema koroziji može se povećati povećanjem debljine površinskoga oksidnog sloja elektrokemijskim putem, eloksiranjem. Zbog male gustoće (trećinu manja od gustoće čelika), dobrih mehaničkih (Tablica 1), električnih i kemijskih svojstava aluminij se primjenjuje u gradnji zrakoplova, vozila, dalekovoda, u elektrotehnici, u kemijskoj industriji, metalurgiji, građevinarstvu, kućanstvu i dr. [3, 4].



Slika 3. Uporaba aluminija i njegovih legura [5,6]

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [4]

Gustoća	2700 kg/m ³
Talište	660 °C
Modul elastičnosti	69000 MPa
Toplinska rastezljivost	23,8 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹
Električna vodljivost	36 – 37,8 m/Ωmm ²
Granica razvlačenja	20 – 120 MPa
Vlačna čvrstoća (ovisno o stanju)	40 – 180 MPa
Istezljivost	4 – 50 %

2.4. Podjela aluminijevih legura

Kao izvrsna alternativa čeliku, aluminiju raste primjena u tehničke svrhe, najviše u procesu zavarivanja. Vrlo široku primjenu aluminij ima kad se koristi legiran s drugim metalima. Cilj legiranja je poboljšanje mehaničkih svojstava, vlačne čvrstoće i tvrdoće, krutosti, rastezljivosti, rezljivosti. Aluminij se najčešće legira sa sljedećim elementima: bakar, magnezij, silicij, cink i mangan, a u manjim količinama tu su i: željezo, krom i titan. Svi legirni elementi su pri dovoljno visokim temperaturama potpuno topljivi u rastaljenom aluminiju. Legure aluminijske mogu se podijeliti prema tehnologiji preoblikovanja na lijevane i gnječene (kovane) legure [7].

2.4.1. Lijeivane legure

Lijeivane legure nastaju lijevanjem u pijesak, u kokilu i tlačno. Radi poboljšanja lijeivčkih svojstava aluminiju se dodaju silicij, bakar ili magnezij, pojedinačno ili u kombinaciji. Ove su legure lagane i imaju dobra mehanička svojstva, pa se koriste u izgradnji strojnih dijelova, zrakoplova i svemirskih letjelica. Lijeivane legure mogu se svrstati u tri osnovne skupine (Tablica 2), [4, 8].

Tablica 2. Osnovna svojstva lijeivanih aluminijevih legura [4, 9]

Vrsta legure	Prednosti	Mane
Al – Si (silumin)	dobra otpornost na koroziju, dobra livljivost, dobra rezljivost	slaba mehanička otpornost
Al –Mg	dobra korozijska postojanost, otpornost na udarce, legura s 10 % Mg – najčvršća i najžilavija	jedna od najteže livljivih legura
Al - Cu	osrednje visoka čvrstoća srednja udarna otpornost dobra rastezljivost otpornost na više temperature	slaba livljivost, najslabija otpornost na koroziju

2.4.2. Gnječene legure

Gnječene ili kovne legure sadrže bakar, magnezij, mangan, a ponekad cink i nikal. Lijevaju se u ingote ili šipke koje se potom toplo ili hladno deformiraju željenim postupkom. Ove su legure pogodne za izvlačenje i prešanje [4]. Zbog duktilnosti i obradljivosti aluminija, ekstruzija je jednostavna metoda za proizvodnju kompleksnih oblika, pogotovo za duge dijelove, poput I i H nosača, kutova, kanala, T-dijelova, cijevi i slično. Toplo i hladno kovanje brza je i ekonomična metoda za izradu jednostavnih oblika. Precizno kovanje je pogotovo prikladno za aluminijske legure zbog dobre završne obrade površine, uskih tolerancija te eliminacije naknadne strojne obrade. Osnovna podjela gnječenih aluminijskih legura temelji se na kemijskom sastavu i mogućnosti precipitacijskog očvrnuća kako je prikazano u tablici 3, [10].

Tablica 3. Podjela i osnovne značajke gnječenih aluminijskih legura [4, 10]

Vrsta legure	Način očvrnuća	R_m , MPa
1. Al-Mn	deformiranjem u hladnom stanju (toplinski neočvrstive legure)	200...350
2. Al-Mg		
3. Al-Mg-Mn		
4. Al-Mg-Si	precipitacijom (toplinski očvrstive legure)	~330
5. Al-Cu-Mg		~450
6. Al-Zn-Mg		~400
7. Al-Zn-Mg-Cu		~550
8. Al-Li-Cu-Mg		~500

2.5. Označivanje aluminijevih legura

Aluminijeve legure označavaju se numerički ili kemijskim simbolima [11].

2.5.1. Označivanje lijevanih aluminijevih legura

Lijevane aluminijeve legure označavaju se prema europskoj normi EN 1780 [11]:

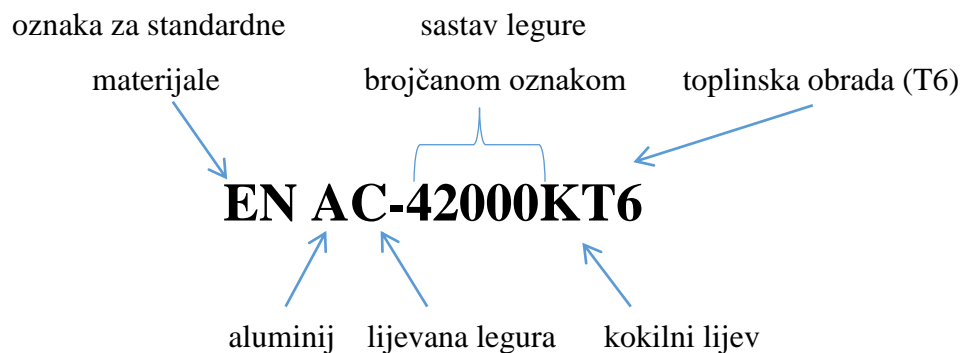
- a) brojčanom oznakom (pet znamenaka)
- b) slovno brojčanom oznakom (kemijskim simbolima).

U slučaju numeričkih oznaka legura za lijevanje, zadnja znamenka označava proizvodni oblik, 1 ili 2 se odnosi na ingot (ovisno o čistoći), a 0 je oznaka za lijevanje.

Osim toga koriste se i oznake:

- EN – za standardne materijale, slijedi slobodno mjesto
- A – reprezentira aluminij
- C - lijevani proizvod (engl. *casting*) iza kojeg slijedi crtica.

Primjerice, legura Al 7%SiMg, lijevana u kokilu, homogenizirana i umjetno dozrijevana:



Prvo slovo iza peteroznamenkastog broja ukazuje na primjenjeni postupak lijevanja [11]:

- D – tlačno lijevanje
- L – precizni ili točni lijev
- K – lijevanje u trajne kalupe ili kokile
- S – lijevanje u pješčane kalupe.

U tablici 4. prikazane su brojčane oznake aluminijskih ljevanih legura prema SAE (engl. *Society of Automotive Engineers*). Prvi broj brojčane oznake označava glavni legirni element, tj. seriju kojoj legura pripada, druga znamenka pokazuje modifikaciju legure, a zadnje dvije znamenke definiraju pobliže aluminijsku leguru ili ukazuju na čistoću aluminija (npr. 1060 označava leguru 99,6 % Al) [11].

Tablica 4. Grupe ljevanih aluminijskih legura prema SAE [10, 11]

1xxx	čisti Al (>99 %)
2xxx	Al-Cu
3xxx	Al-Si-Cu/Mg
4xxx	Al-Si i Al-Mg-Si
5xxx	Al-Mg
6xxx	Al-Mg-Si
7xxx	Al-Zn
8xxx	Al-Sn
9xxx	Ostali elementi

U tablici 5. navode se značenje ostalih oznaka za toplinsko stanje ljevanih aluminijskih legura.

Tablica 5. Oznake toplinskih stanja ljevanih legura – EN 1706 [11]

F	Ljevano, toplinski neobrađeno
O	Žareno
T1	Kontrolirano hlađeno pri skrućivanju i prirodno dozrijevano
T4	Rastopno žareno i prirodno dozrijevano
T5	Kontrolirano hlađeno pri skrućivanju i umjetno dozrijevano ili pre-dozrijevano
T6	Rastopno žareno i umjetno dozrijevano
T64	Rastopno žareno i umjetno pod-dozrijevano
T7	Rastopno žareno i umjetno pre-dozrijevano (stabilizirano)

2.5.2. Označivanje gnječenih aluminijevih legura

Gnječeni aluminij i aluminijeve legure su primarno namijenjene za proizvodnju toplim i hladnim oblikovanjem deformiranjem, kao npr. valjanjem, ekstrudiranjem, kovanjem i vučenjem. Gnječene aluminijeve legure označavaju se prema europskoj normi EN 573 [4].

Ovim standardom metalurško stanje legura definira se slovniim simbolima iza kojih slijedi brojučana oznaka do tri znamenke, što ovisi o vrsti legure aluminija [10].

Gnječene legure se označavaju sljedećim oznakama [11]:

- EN – za standardne materijale, slijedi slobodno mjesto
- A – reprezentira aluminij
- W – gnječeni materijal (engl. *wrought*)
- sastav legure određen je:
 - a) brojčanom oznakom (4 znamenke), tablica 6.
 - b) kemijskim simbolima iza kojih slijedi slovo i/ili znamenka koji označavaju metalurško stanje.

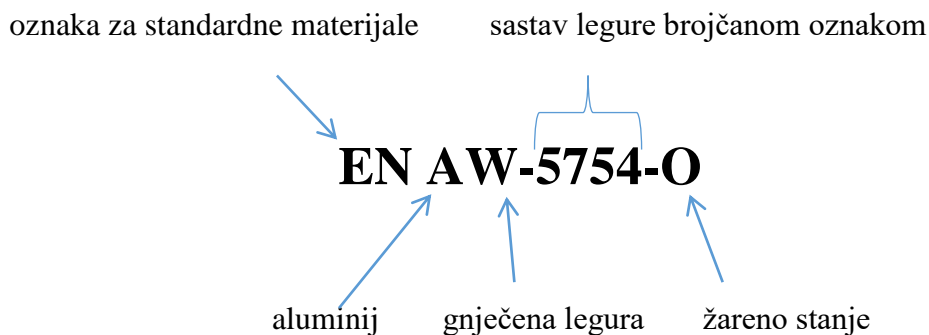
Tablica 6. Numeričke oznake gnječenih legura aluminija [10, 11]

1xxx	komercijalno čist Al (99 %)	H
2xxx	Al-Cu	T
3xxx	Al-Mn	H
4xxx	Al-Si	H/T
5xxx	Al-Mg	H
6xxx	Al-Mg-Si	T
7xxx	Al-Zn	T
8xxx	Al-Fe, Li, ...	H/T
9xxx	-	-

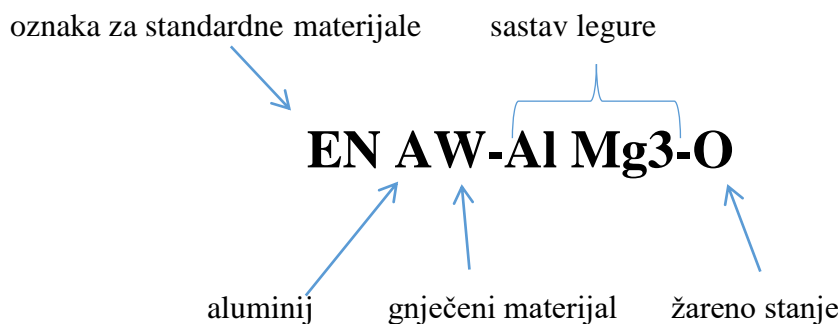
Napomena: (H) – hladno deformirano (toplinski neobrađeno), (T) – toplinski obrađeno

Primjerice, legura AlMg označava se:

a) brojčanom oznakom od četiri znaka:



b) slovno brojčanom oznakom – kemijskim simbolima:



Mehanička svojstva legura osim o njihovom kemijskom sastavu ovise i o njihovom metalurškom stanju, npr. žareno, hladno kovano, toplinski obrađeno. Važno je da se metalurško stanje legure jasno i nedvosmisleno identificira od strane inženjera zavarivanja i konstruktora. Kako bi se to ostvarilo Europski odbor za standardizaciju (engl. *European Committee for Standardization*, CEN) je razvio sustav sufiksa koji identificiraju kroz koju količinu oblikovanja deformiranjem ili u kojem se stanju toplinske obrade legura nalazi [11].

Postoji pet osnovnih oznaka identificiranih slovom prema normi EN 515 (Tablica 7), iza kojih može biti jedno ili više brojeva koji označuju precizno stanje [11].

Tablica 7. Stanje toplinske obrade gnječenih legura [11, 13]

F	<p><u>Primarno (isporučeno) stanje</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - mehanička svojstva nisu specificirana - primjenjuje se na proizvode dobivene plastičnom deformacijom bez da su postupci toplinske ili mehaničke obrade izvođeni pod posebnim nadzorom.
O	<p><u>Žareno stanje (engl. <i>annealed</i>)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - u svrhu smanjenja čvrstoće - to je stanje najveće oblikovljivosti koje može biti postignuto zadržavanjem legure na umjerenoj temperaturi određeno vrijeme.
H	<p><u>Očvrsnuto stanje materijala hladnom deformacijom (engl. <i>strain hardened</i>)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - za legure očvrsnute plastičnom deformacijom, s naknadnim zadržavanjem ili bez naknadnog zadržavanja, na temperaturi koja izaziva djelomično omekšavanje metala. - za toplinski neočvrstljive legure aluminija serija 1000, 3000 i 5000. - iza ove oznake slijede uvijek najmanje dva broja. Prvi označava vrstu toplinske obrade, a drugi stupanj hladnog otvrdnjavanja.
W	<p><u>Rastopno žareno (homogenizirano) stanje</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - metalurški nestabilno stanje, primjenjuje se samo za legure koje nakon rastopnog žarenja spontano otvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi. - ova oznaka je precizna (važeća) samo onda kada joj je pridruženo i vrijeme koje prođe od rastopnog žarenja do temperature na kojoj je proizvod zadržan, npr. vrijeme 60 minuta do 15 °C (W/60 min/15 °C).
T	<p><u>Rastopno žareno i dozrijevano (precipitacijsko očvrsnuto stanje)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - za proizvode koji stabilno stanje postižu toplinskom obradom, sa ili bez hladnog očvršćivanja. - isključivo za toplinski očvrstljive legure aluminija serija 2000, 6000, 7000. - iza oznake T uvijek stoji jedan ili više brojeva koji označuju specifični redoslijed različitih postupaka.

2.6. Aluminijska legura EN AW 5xxx (AlMg)

Mehanička svojstva se mogu značajno povećati legirajućim elementima tvoreći tako legure aluminijske. Pri tome se razlikuju dvije skupine [7]:

1. Al-legure bez strukturnog očvršćavanja tzv. "nekaljive legure":

AlMn, AlMgMn, AlMg.

2. Al-legure sa strukturnim očvršćavanjem tzv. "kaljive legure":

AlCuMg, AlMgSi, AlMgSi, AlZnMg, AlLiCuZr, AlLiCuMgZr

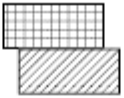
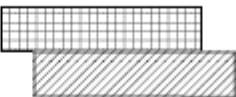
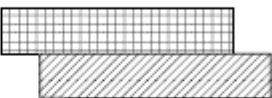
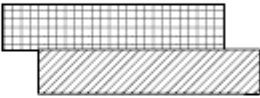
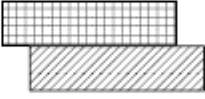

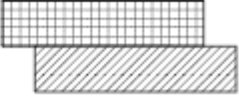
Aluminijske legure (AlMg) su legure koje se sastoje od aluminijske i magnezije kao glavnog legirajućeg elementa. Pripadaju standardiziranoj seriji 5xxx koje ne očvršćuju toplinskom obradom, već hladnom deformacijom. Imaju srednju vrijednost čvrstoće (130-380 MPa) i znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. Osim magnezije, često sadrže i druge elemente kao što su mangan, krom i titan čija je uloga povećanje vlačne čvrstoće, otpornosti koroziji i zavarljivosti. AlMg legure su među najvažnijim građevinskim materijalima. Mogu se dobro hladno oblikovati, pa se često valjaju u obliku cijevi, žica, različitih profila i drugo [12].


Mehanička svojstva AlMg legura u značajnoj mjeri ovise o temperaturi legura i magnezijevom sadržaju. Povećanjem sadržaja magnezije poboljšavaju se mehanička svojstva, ali istovremeno opada sposobnost oblikovanja, pa udio magnezije u leguri obično ne prelazi 5 %. Magnezij je utjecajniji očvršćivač od mangana što potvrđuje činjenica da udio od 0,8 % magnezije postiže jednake efekte očvršćenja kao 1,25 % Mn. Neke od AlMg legura s najvećom čvrstoćom su: EN AW-5456, EN AW-5083 i EN AW-5086 [12, 13].


Legure s većim sadržajem magnezije odlično se ponašaju u morskoj vodi i imaju dobru otpornost prema interkristalnoj koroziji. Međutim, ako se duže izlažu višim temperaturama (od 65 °C do 180 °C), otpornost koroziji se može smanjiti. Zbog otpornosti na morsku vodu AlMg legure se često koriste u brodogradnji, a primjenu nalaze i u izradi zrakoplovnih dijelova, građevini, za izradu posuda, različitih cisterni i slično [12, 13].

Mehanička svojstva nekih AlMg legura prikazana su u tablici 8.

Tablica 8. Mehanička svojstva AlMg legura [14]

Legura	Serija	Tip	Internacionale oznake	Raspon mehaničkih karakteristika (MPa)						
				0	100	200	300	400	500	600 700
Toplinski Neočvrstive legure	1000	Al	1050A 1070A 1100 1200 1080							
	3000	Al-Mn	3003 3004 3005 3105							
	5000	Al-Mg	5086 5083 5056A 5456 5052 5005 5454 5754 5254 5182							
Toplinski očvrstive legure	2000	Al-Cu Al-Cu-Mg	2011 2030 2017A 2618A 2024 (2124) 2014 (2214) 2219							
	6000	Al-Si-Mg	6005A 6060 6061 6082 6081 6106 6351							
		Al-Zn-Mg	7020 7021 7039							
	7000	Al-Zn- Mg-Cu	7049A 7175 7075 7475 7010 7150 7050							

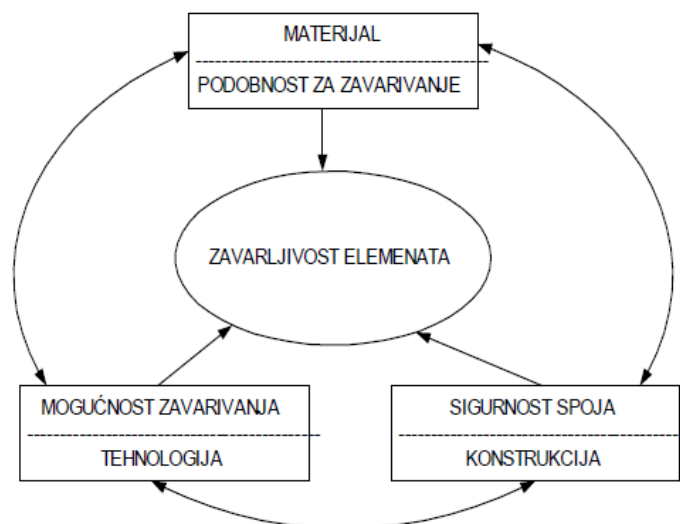
Granica razvlačenja R_p 

Prekidna čvrstoća R_m 

2.7. Zavarljivost aluminija

Zavarljivost je pojam u zavarivačkoj tehnologiji koji se odnosi kako na osnovni i dodatni materijal, tako i na zavarivani proizvod, parametre, režim i postupak zavarivanja. To je sposobnost materijala da pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvari kontinuirani zavareni spoj koji će svojim svojstvima zadovoljiti traženi vijek primjene i uvjete u kojima će se nalaziti. Zavarljivost se utvrđuje za svaki slučaj zavarivanja posebno.

Slika 4. prikazuje glavne čimbenike na zavarljivost i njihovu međusobnu ovisnost. To su: materijal koji se zavaruje i njegov kemijski sastav (udio legiranih elemenata i moguće nečistoće), sigurnost spoja koja ovisi o konstrukciji i mogućnost zavarivanja koja ovisi o odabranoj tehnologiji zavarivanja [15].



Slika 4. Čimbenici koji utječu na zavarljivost [16]

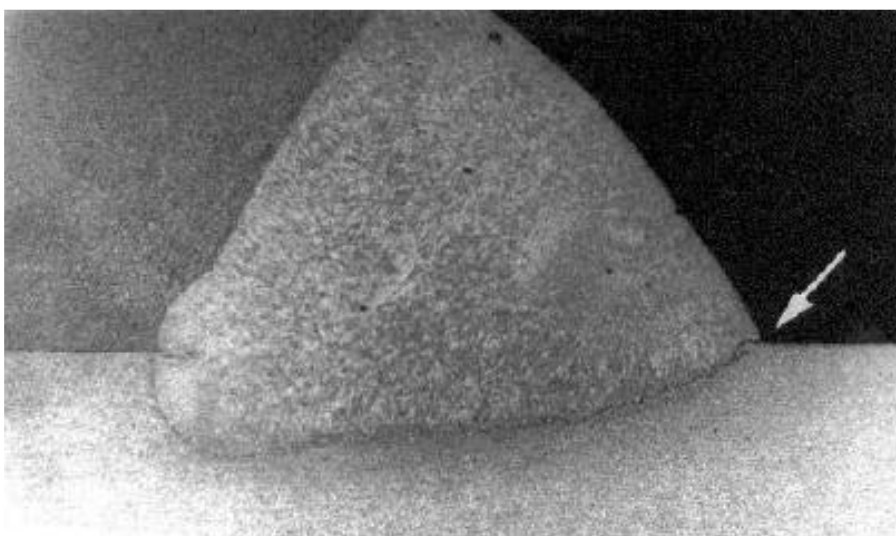
Zavarljivost može biti [16]:

- dobra (ako se može zavarivati bez specijalnih predradnji i mjera opreza)
- slaba (ako su potrebne specijalne predradnje kao npr. predgrijavanje zbog mogućnosti nastanka pukotina)
- jako slaba (ako su potrebne takve predradnje i mjere opreza da praktički nije moguće izvesti zavarivanje koje bi bilo ekonomski prihvatljivo).

Aluminij i aluminijeve legure mogu se spajati svim postupcima zavarivanja. Zavarljivost ovisi o odabranom postupku, o sadržaju legirajućih elemenata i stanju legure.

Najveća prepreka u elektrolučnom zavarivanju aluminija njegov je tanki zaštitni sloj aluminijeva oksida koji ga štiti od korozije. Talište oksidnog sloja je 2060 °C dok je talište aluminija 660 °C te je prije zavarivanja potrebno ukloniti taj sloj.

Oksidni sloj potrebno je ukloniti kako se aluminij ne bi rastalio i ostao ispod postojanog oksidnog sloja (Slika 5), kako ne bi utjecao na smanjenje čvrstoće zavara i kako bi se smanjio rizik od poroznosti [13].

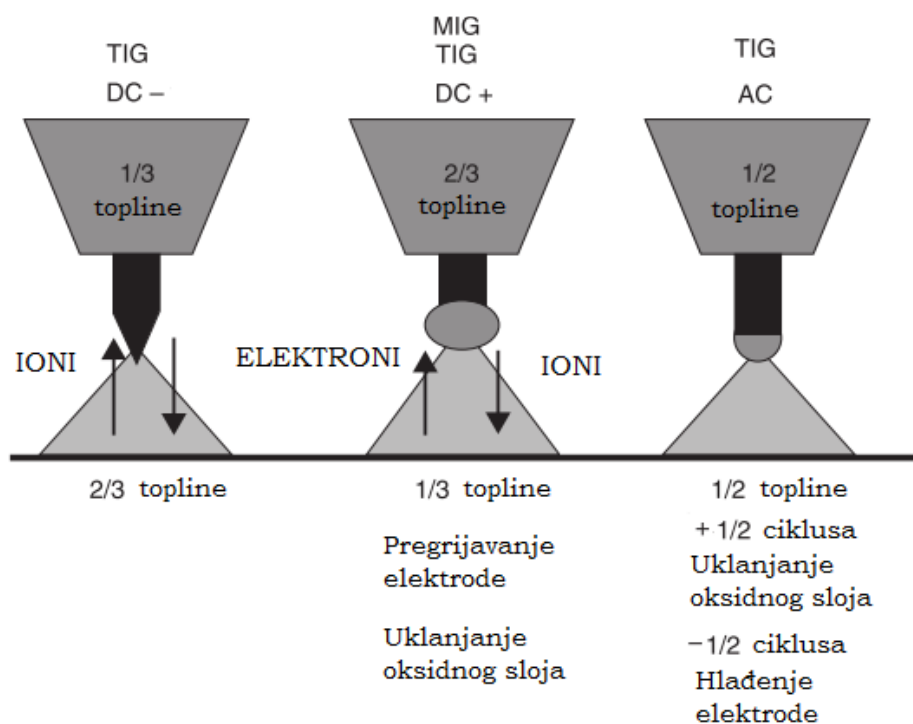


Slika 5. Oksidni sloj "zarobljen" unutar zavara [13]

S površine aluminija oksidni sloj se uklanja odgovarajućim postupcima: mehaničkim putem, struganjem, četkanjem, kemijskim sredstvima i drugim. Jedan od načina uklanjanja oksidnog sloja je korištenje talila koje se primjenjuje samo pri plinskom zavarivanju. Talilo otapa oksidnu prevlaku i prevodi je u trosku (nižeg tališta od aluminija) koja pliva na površini rastaljenog metala. Nakon zavarivanja, talilo se mora brzo i u potpunosti odstraniti jer zbog velikog kemijskog afiniteta prema aluminiju može uzrokovati koroziju [13].

Pri zavarivanju pod zaštitnim plinom, najviše se koriste MIG i TIG postupci u zaštiti argona i helija, oksidna se prevlaka uklanja katodnim čišćenjem. Postupak se provodi spajanjem elektrode (taljive žice) na pozitivan pol i radnog komada na negativan pol izvora istosmjernе struje. To uzrokuje kretanje elektrona od radnog komada prema elektrodi te tok iona od elektrode prema radnom komadu. Ioni na površini radnog komada uništavaju oksidni sloj („ionsko čišćenje“) te omogućuju difuziju taline dodatnog materijala s osnovnim.

Katodno čišćenje aluminijeve površine razlikuje se kod zavarivanja MIG postupkom od TIG postupka. MIG postupak koristi samo istosmjernu (engl. *direct current*, DC) s pozitivnim polom na elektrodi, dok TIG postupak većinom koristi izmjeničnu struju (engl. *alternating current*, AC) osim u specijalnim slučajevima. Izmjenična struja kod TIG postupka koristi se zbog kompromisa između dvaju polova, a to je da se oksidni sloj uklanja na pozitivnom poluciklusu, a elektroda se hladi u drugom poluciklusu, spojena na negativan pol izvora. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline prikazan je na slici 6 [13].



Slika 6. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline kod MIG i TIG zavarivanja [13]

2.7.1. Utjecaj svojstava aluminija na zavarljivost

Osim prethodno spomenutog problema s oksidnim slojem oksida, na zavarljivost aluminija i njegovih legura utječu sljedeća svojstva aluminija [17]:

- Dobra toplinska vodljivost

Za zavarivanje aluminija i njegovih legura potrebni su veliki i koncentrirani tokovi energije i unosi topline, unatoč niskom talištu. Razlog tomu je dobra toplinska vodljivost aluminija koja je tri puta veća od čelika. Za čisti aluminij toplinska vodljivost iznosi 240 W/mK, dok za aluminijeve legure između 117 i 155 W/mK.

- Izvrsna električna vodljivost

Zbog izvrsne električne vodljivosti aluminij i aluminijeve legure zahtijevaju velike jakosti struje i kratko vrijeme elektrootpornog zavarivanja. Ako se zavaruje sa slabim i nedovoljno koncentriranim tokovima energije, nastaje široka zona utjecaja topline niske čvrstoće.

- Veliki koeficijent toplinske dilatacije

Pri hlađenju aluminija i njegovih legura moguća je pojava pukotina zbog jakog stezanja i deformacija koje se javljaju na zavarivanom predmetu.

- Velika topljivost vodika

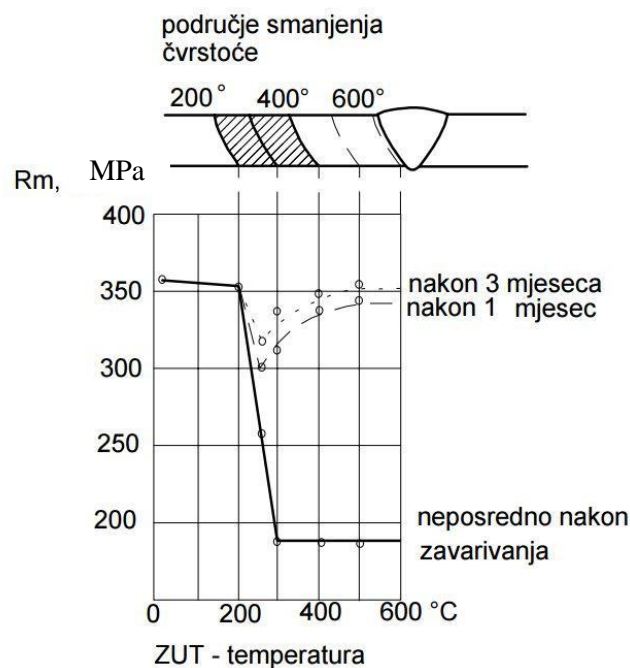
U rastaljenom metalu, tokom kristalizacije se oslobađuju mjehurići vodika koji mogu uzrokovati poroznost. Razlog nastanka mjehurića je nagli pad topljivosti vodika.

- Sklonost vrućim i hladnim pukotinama

Nastanak pukotina ovisi o kemijskom sastavu i uvjetima zavarivanja.

- Omekšanje na mjestu zavarenog spoja

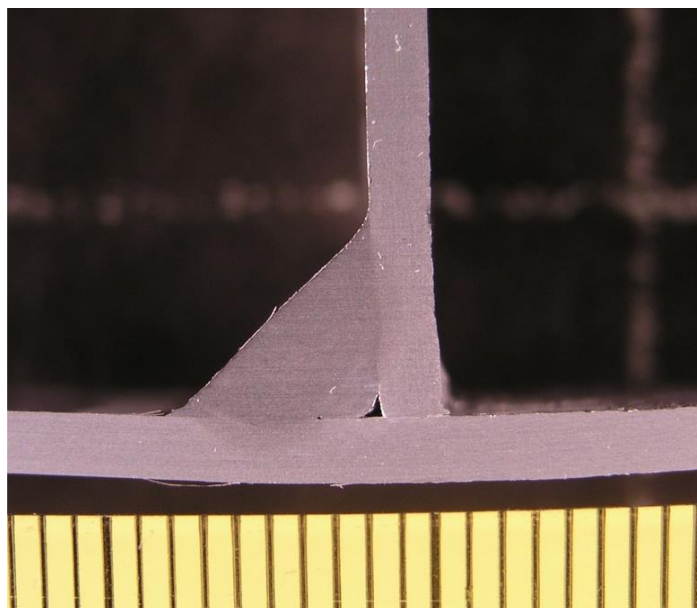
Zbog ljevačke strukture aluminija na mjestu zavarenog spoja čvrstoća je najmanja, kao u meko žarenom stanju. Zato se u zrakoplovnoj industriji još uvijek koriste zakovani spojevi na mjestima koja bi se mogla spojiti zavarom. Aluminijski materijali postaju znatno čvršći hladnom deformacijom, primjerice valjanjem (Slika 7).



Slika 7. Omekšanje na mjestu zavarenog spoja [13]

2.7.1.1.. Utjecaj topline na zavarivanje aluminijskih legura

Toplinska vodljivost aluminijskih legura veća je približno tri puta nego kod čelika. Ovo svojstvo aluminijskih materijala utječe na brzo odvođenje topline s mjesta zavarivanja što smanjuje brzinu zavarivanja i dubinu protaljivanja. Naglo odvođenje topline ubrzava skrućivanje taline zvara, smanjuje mogućnost otplinjavanja te povećava mogućnost pojave poroznosti i naljepljivanja (Slika 8). Osim toga, dobra toplinska provodljivost aluminijskih materijala proširuje zonu utjecaja topline čime se smanjuje čvrstoća zavarenog spoja u ZUT-u, naročito kod očvrstnutih aluminijskih materijala. Problem se rješava povećanjem unosa topline ili predgrijavanjem materijala. Predgrijavanje se izvodi elektrootporno, indukcijski, plameno, u pećima i drugom ovisno o raspoloživoj opremi. Unos topline se može povećati povećanjem struje zavarivanja ili korištenjem adekvatne zaštitne atmosfere kao npr. mješavine argona i helija [18].



Slika 8. Primjer naljepljivanja aluminijske legure [20]

Temperatura predgrijavanja ovisi o sastavu legure, debljini materijala te o vrsti postupka zavarivanja. Formula za izračun temperature (8) predgrijavanja glasi [18]:

$$T_{\text{pred}} = T_s - 745 / \lambda_{\text{Al.leg.}} \quad (8)$$

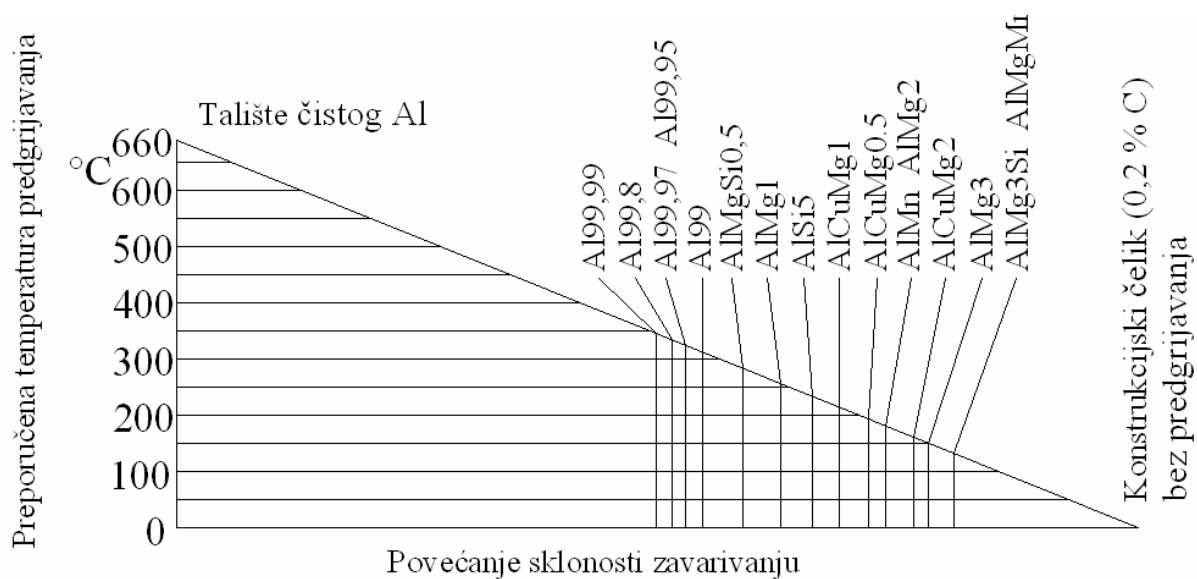
gdje je:

T_{pred} = temperatura predgrijavanja u °C

T_s = temperatura početka taljenja (solidus temperatura) u °C

$\lambda_{\text{Al.leg.}}$ = toplinska vodljivost u W/mK

Temperature predgrijavanja aluminijskih legura dobivene prethodnim izrazom prikazane su slikom 9.



Slika 9. Temperature predgrijavanja aluminijskih legura [21]

U tablici 9. navedene su orijentacijske vrijednosti temperature i vremena predgrijavanja za hladno oblikovljive legure.

Tablica 9. Vrijednosti temperature i vremena predgrijavanja [19]

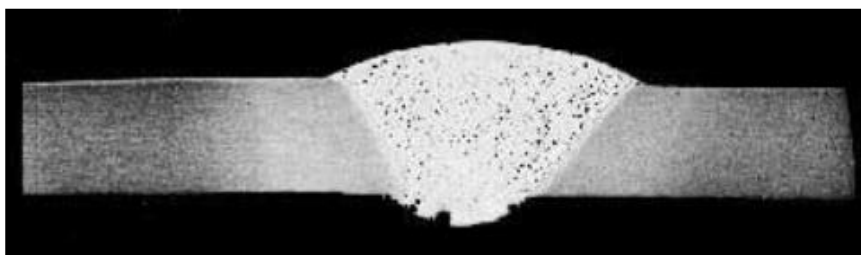
Legura	Raspon debljina u mm		Max. temperatura predgrijavanja (°C)	Max. vrijeme predgrijavanja (min)
	TIG	MIG		
AlMgSi AlSi1MgMn AlSiMg(A)	≥ 5 do 12 (>12)	>20	180 200 220 250	60 30 20 10
AlZn4,5Mg1	≥4 do 12 (>12)	>16	140 160	30 20
AlMg4,5Mn0,7 AlMg3	≥6 do 12 (>12)	>16	150 do 200	10

2.7.2. Nepravilnosti u zavaru aluminija i aluminijevih legura

Aluminij ima sklonost stvaranja prevlaka aluminijeva oksida na svojoj površini koji uzrokuje uključke u zavaru u obliku tankog oksidnog sloja, što utječe na smanjenje čvrstoće zavara, poroznost i stvaranja toplih pukotina.

2.7.2.1. Poroznost

Poroznost je šupljikavost koja se pojavljuje u strukturi metala zavara prilikom zavarivanja različitih vrsta materijala. Uzrokovana je otopljenim plinom (vodik) u talini zavarenog metala koji tijekom hlađenja ostaje zarobljen u obliku mjehurića u skrutnutom metalu (Slika 10) [13].

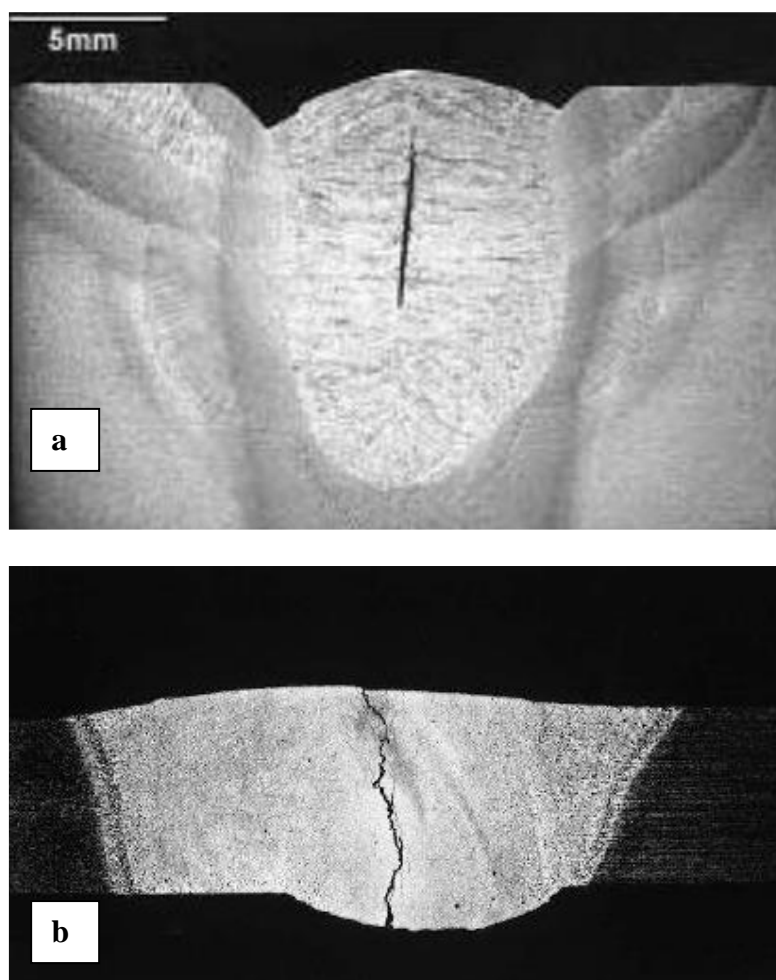


Slika 10. Poroznost u sučeljenom spoju aluminija debljine 6 mm (TIG postupak zavarivanja) [13]

Poroznost može varirati do pora od čak 3-4 mm u promjeru. Kod zavarivanja aluminija glavni razlog za poroznost je topljivost vodika u krutini aluminija koja je za otprilike 20 puta manja od topljivosti u rastaljenom aluminiju. Vodik u područje zavara dolazi preko raznih nečistoća, okolnog zraka, zaštitnih plinova koji se koriste prilikom zavarivanja i sl. Jedan od glavnih izvora vodika je i aluminijev oksid, koji je sam po sebi porozan i apsorbira vlagu. Kako je aluminij sklon stvaranju oksida na svojoj površini smatra se da je poroznost neizbježna prilikom zavarivanja aluminija i njegovih legura. Poroznost je moguće umanjiti smanjenjem brzine zavarivanja i legiranjem s magnezijem (do 6 % magnezija duplo smanjuje apsorpciju vodika). S druge strane, legiranje bakrom ili silicijem i povećanjem duljine električnog luka imaju suprotan efekt i povećavaju poroznost zavarenog spoja. Što se tiče postupaka zavarivanja, zavar izrađen TIG postupkom ima niže razine poroznosti od zavara izrađenog MIG postupkom zbog veće mogućnosti kontaminacije žice dodatnog materijala i većih brzina zavarivanja [13].

2.7.2.2. Tople pukotine

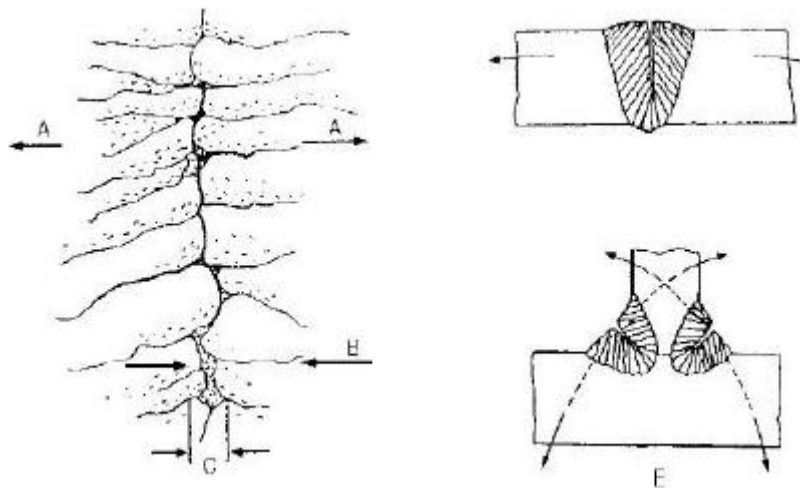
Osim poroznosti, česti problem koji se javlja prilikom zavarivanja aluminija i njegovih legura su tople ili solidifikacijske pukotine. Nastaju u temperaturnom području od 1200 °C do 900 °C kao posljedica poprečnih reakcijskih naprezanja tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Pukotine se prostiru po granicama zrna materijala, najčešće po dužini zavora, ali su moguće i u zoni utjecaja topline. Pojava toplih pukotina je povezana s nečistoćama u materijalu, legiranjem, parametrima zavarivanja, nepovoljnim oblikom žlijeba i nepravilnim izborom dodatnog materijala (Slika 11a, 11b), [13].



Slika 11. Tople pukotine u sučeljenom spoju 3 mm debelih ploča aluminijske legure A6082 s dodatnim materijalom 4043, TIG postupak: a) Unutarnja topla pukotina (nije otvorena prema površini) b) Pukotina kroz cijelu površinu zavora [13]

Mehanizam nastajanja toplih pukotine može se objasniti slikom 12 [22].

- Skrućivanje zavora počinje od hladnih stranica žlijeba prema sredini zavora, a talina popunjava razdvojeni dio (B)
- U završnoj fazi skrućivanja preostaje tanki film taline između zrna skrućenog metala (C)
- Područje skrućenog materijala skuplja se u smjeru suprotnom od pravca skrućivanja stvarajući velika naprezanja (A)
- Ako u procesu između skupljanja i skrućivanja, nadvlada sakupljanje, ostat će zrna materijala razdvojena, u toplom stanju- topla pukotina (E).



Slika 12. Shematski prikaz mehanizma nastajanja toplih pukotina [22]

A Pravac skupljanja metala zavora kod skrućivanja

B Pravac skrućivanja metala zavora

C Preostala talina na granici zrna

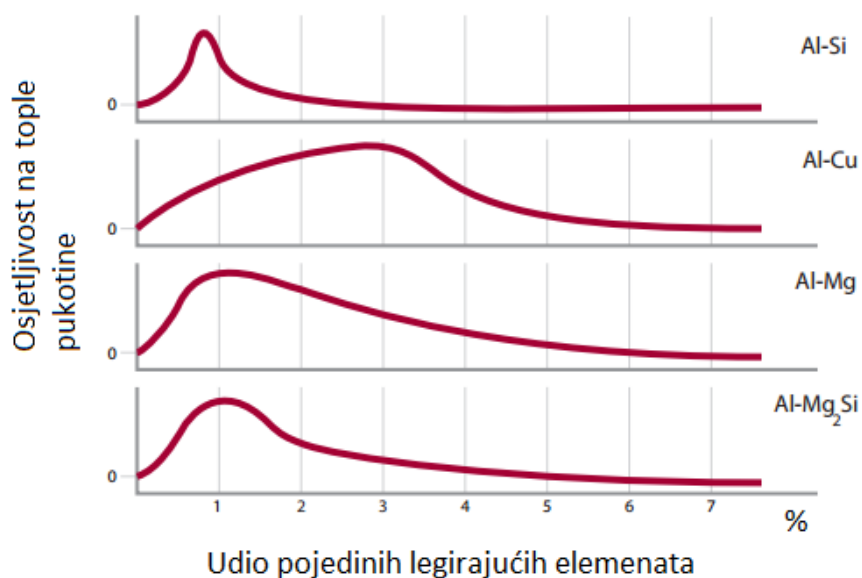
E Pravci opiranja osnovnog materijala skupljanju zavora

Načini sprječavanja nastajanja toplih pukotina su [22]:

- Smanjenje veličina kristalnog zrna. Mali dodatak titana, cirkonija ili skandija (do 0,1 %) služi kao jezgra za razvoj finog, sitnog kristalnog zrna tijekom solidifikacije.
- Kontrola sastava taline zavora dodavanjem odgovarajućeg dodatnog materijala kojim bi se postigao sastav legure koji nije sklon pojavi toplih pukotina.
- Odgovarajuća priprema spoja i razmak između komada kako bi se omogućilo dovoljno i uspješno dodavanje dodatnog materijala.

- Zavarivanje najvećom mogućom brzinom. Velike brzine skraćuju vrijeme u kojemu je zavar u rasponu visokih temperatura pri kojima se pojavljuju tople pukotine. Visoka brzina zavarivanja također smanjuje veličinu ZUT-a te naprezanja uslijed kontrakcije tijekom hlađenja zavora.
- Odabir zavarivačkog postupka te montažnog niza koji minimizira zaostala naprezanja.
- Upotreba vanjske sile koja osigurava tlačno opterećenje zavora dok je u rasponu visokih temperatura koje pogoduju stvaranju toplih pukotina.
- Odabir dodatnog materijala s talištem sličnim osnovnom metalu.

Slika 13. prikazuje utjecaj najčešćih legiranih elemenata u aluminiju na pojavu toplih pukotina.



Slika 13. Utjecaj legirajućih elemenata na osjetljivost toplih pukotina [23]

2.7.3. Odabir dodatnog materijala kod zavarivanja Al i Al-legura

Kod zavarivanja aluminijske legure vrlo je bitno izabrati kvalitetni dodatni materijal s odgovarajućim legirnim elementima. Dodatnim materijalom se izravno utječe na mehanička svojstva zavara i na trajnost aluminijske konstrukcije koju treba izraditi. Pravilnim odabirom moguće je utjecati na niz čimbenika kao što su: pojave grešaka, otpornost na koroziju, istezljivost, zavarljivost, radna temperatura i drugo.

Osnovni princip odabira dodatnog materijala temelji se na sljedećem [21]:

- definiranje osnovne vrste materijala i njegove debljine
- definiranje postupka zavarivanja i vrste spoja
- definiranje zahtjeva na zavareni spoj:
 - a) otpornost na pojavu pukotina
 - b) zahtjev na čvrstoću i duktilnost
 - c) zahtjev na korozijsku otpornost
 - d) svojstva materijala na povišenim temperaturama
- za toplinski neobradljive legure koristi se tablica za izbor dodatnog materijala (obratiti pažnju na odnos Mg/Si)
- za toplinski obradljive legure (obratiti pažnju na pojavu toplih pukotina, ZUT pukotina).

Dodatni materijali izabiru se prema postupku zavarivanja, a od osnovnih postupaka najviše se koriste prilikom MIG zavarivanja aluminijske legure gdje je jako bitna čistoća žice. Ukoliko površina žice nije čista kasnije izvedeni zavari mogu imati razne nepravilnosti u strukturi kao što su tople pukotine i poroznost. Žice serije 5xxx AWS mogu adsorbirati vodikov oksid, pa se moraju skladištiti na mjestima gdje je vlažnost manja od 30 %. Dodatni materijal mora biti bez ikakvih nečistoća, masnoće i ostalih kontaminacija.

Odabir preporučenih dodatnih materijala pri zavarivanju aluminijske legure vrši se prema tablici 10. Iz tablice je vidljivo koji dodatni materijal treba odabrati ovisno o osnovnom materijalu, ali i o tome što se želi pri zavarivanju postići. Rubovi tablice označavaju aluminijske legure osnovnih materijala, dok su unutar tablice navedeni preporučeni dodatni materijali. Prazni kvadrati u tablici označavaju nemogućnost postizanja ispravnog zavarenog spoja pri odabiru takve kombinacije osnovnog i dodatnog materijala [21].

Tablica 10. Preporučeni dodatni materijal za zavarivanje dvaju osnovnih aluminijskih materijala [21]

[illegible]

Pri zavarivanju aluminijских materijala potrebno se voditi sljedećim smjernicama [21]:

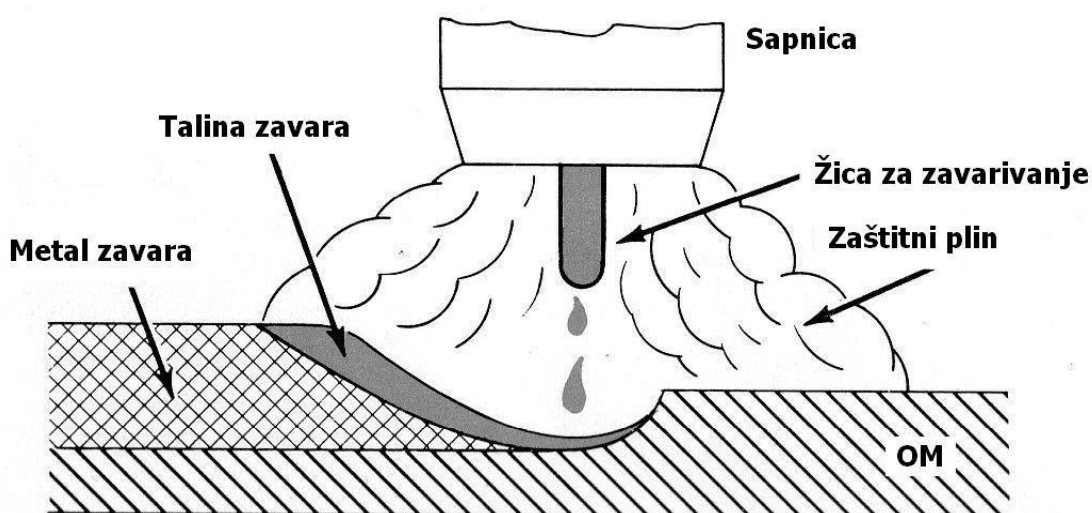
- Kao dodatni materijal isključivo se koriste tzv. toplinski neočvrstive legure.
- Zavareni spoj s bilo kojim dodatnim aluminijskim materijalom ima najniže vrijednosti čvrstoće, tj. one vrijednosti koje dotični materijal ima u mekom (žarenom) stanju.
- Zavarivanje se najčešće primjenjuje kod gnječenih aluminijevih legura
- Pri zavarivanju dvaju osnovnih materijala različitih legura u pravilu treba koristiti dodatni materijal 4043, 5183, 5854, 5356; odnosno legure s oko 5 % silicija i magnezijeve legure sa sadržajem magnezija od 1,5 % do 5,5 %.
- Legure s bakrom (2000 i 7000) u pravilu nisu podobne za zavarivanje.
- Legure (7051 i 7005) bez bakra treba zavarivati isključivo s dodatnim materijalom iz legura 4043 i 5356.

3. ZAVARIVANJE ALUMINIJEVIH LEGURA

Aluminij i aluminijeve legure mogu se spajati zavarivanjem praktički svim postupcima zavarivanja. Najčešće korišteni postupci su MIG i TIG jer se njima osigurava zaštitna atmosfera. TIG postupak se koristi za zavarivanje limova i elemenata do 6 mm, dok se MIG postupak koristi za zavarivanje debljih elemenata, iznad 6 mm [18]. Oznaka MIG zavarivačkog postupka prema normi EN ISO 4063 je 131.

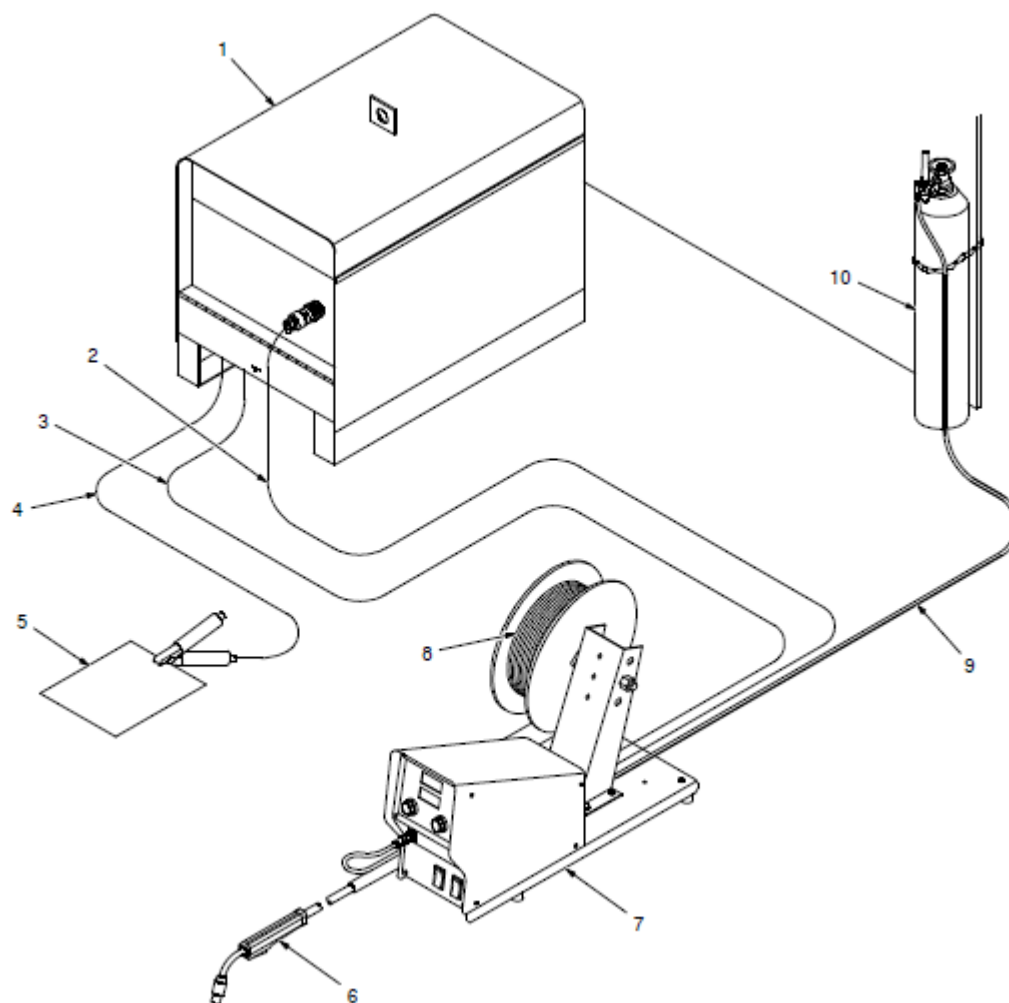
3.1. MIG zavarivanje aluminijevih legura

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom (Slika 14) u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (engl. *Metal Inert Gas*, MIG) je postupak zavarivanja taljenjem kod kojeg se električni luk uspostavlja i održava između taljive žice i radnog komada koji se zavaruje. Proces se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnih plinova koji štite rastaljeni metal od utjecaja okolne atmosfere, a dovode se na mjesto zavarivanja kroz sapnicu pištolja. MIG zavarivanje je visokoproduktivni postupak zavarivanja kojim se vrlo učinkovito može zavarivati velik broj različitih vrsta materijala, među kojima je i aluminij. Mogućnost kvalitetnog zavarivanja, veliki broj specijaliziranih varijanti i odlične mogućnosti automatizacije čine ga danas vodećim postupkom zavarivanja u proizvodnji [24].



Slika 14. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova [26]

3.2. Specifičnosti opreme MIG zavarivanja aluminijevih legura



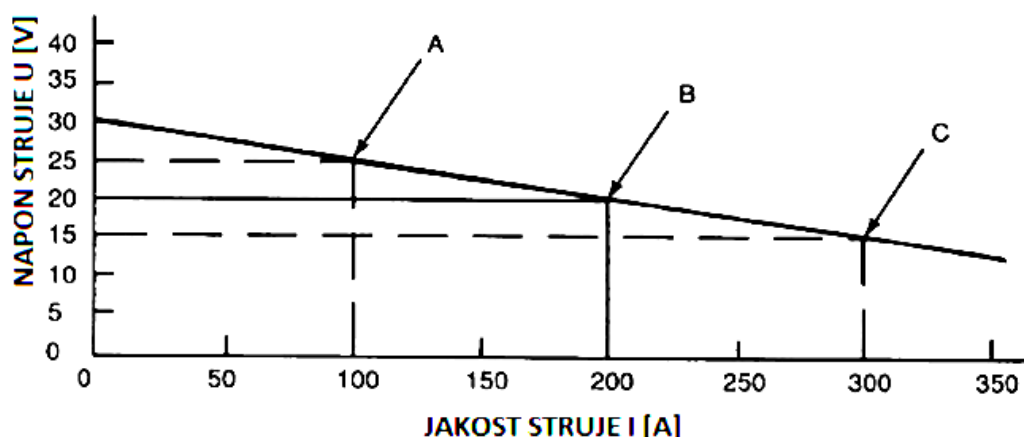
Slika 15. Shema uređaja za zavarivanje MIG/MAG [27]

Osnovni industrijski MIG sustav sastoji se od sljedećih komponenti:

1. izvor struje
2. kabel za napajanje kontrolnog uređaja
3. kabel uređaja za ulaganje
4. kabel za uzemljenje
5. radni komad
6. pištolj za zavarivanje
7. uređaj za konstantnu brzinu dobave žice
8. kolut sa žicom (dodatnim materijalom)
9. crijeva za plin
10. boca sa zaštitnim plinom i regulator protoka.

3.2.1. Izvor struje

Električni luk se može održavati izmjeničnom strujom ili istosmjernom strujom pa se prema tome i izvori struje dijele na izmjenične i istosmjerne. Kod klasičnog MIG postupka zavarivanja u pravilu se koristi istosmjerna struja s elektrodom spojenom na pozitivan pol izvora struje. Kako bi se omogućila lakša uspostava nestabilnog električnog luka prilikom zavarivanja aluminija razvijen je izvor statičke karakteristike ravnog konstantnog napona struje (engl. *Constant Voltage*, CV), (Slika 16). Upotreba ravne karakteristike se isključivo povezuje s poluautomatskim postupcima zavarivanja kao što je MIG. Za impulsno zavarivanje MIG postupkom koriste se posebni izvori sa sinergijskom kontrolom. Taj se sustav zasniva na kontroli pomoću jednog parametra pri čemu se preostali parametri automatski odabiru [28].



Slika 16. Dijagram struje i napona prikazuje ravnu izlaznu karakteristiku, CV [28]

Osim ravne izlazne karakteristike postoji i strmopadajuća statička karakteristika (engl. *Constant Current*, CC). Takva izvedba izvora struje konstruirana je da održava vrijednost jakosti struje približno jednakom dok se vrijednost napona struje mijenja sa visinom električnog luka. Dakle, obrnuto nego kod CV.

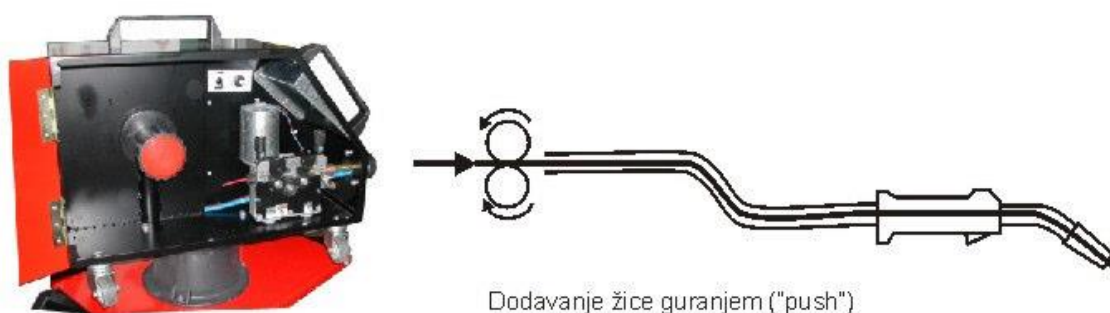
Strmopadajuće karakteristike su prikladne za izvore struje koji se koriste za ručne postupke zavarivanja i ne koriste se kod zavarivanja aluminija zbog varijacija geometrije luka koja loše utječe na kvalitetu zavara.

3.2.2. Pogonski sustav žice

Pogonski sustav žice služi za automatsko dodavanje žice (koja je ujedno i elektroda) u MIG proces zavarivanja. Pogonski sustav se može nalaziti unutar kućišta izvora struje ili van kućišta, ovisno o slobodnom prostoru oko uređaja i kretnjama uređaja za zavarivanje. U većini slučajeva, dodavači žice se postavljaju kao zasebna jedinica van kućišta kako bi bila bolja preglednost namotaja žice na kolutu i kako bi se lakše mogao mijenjati kolut sa žicom.

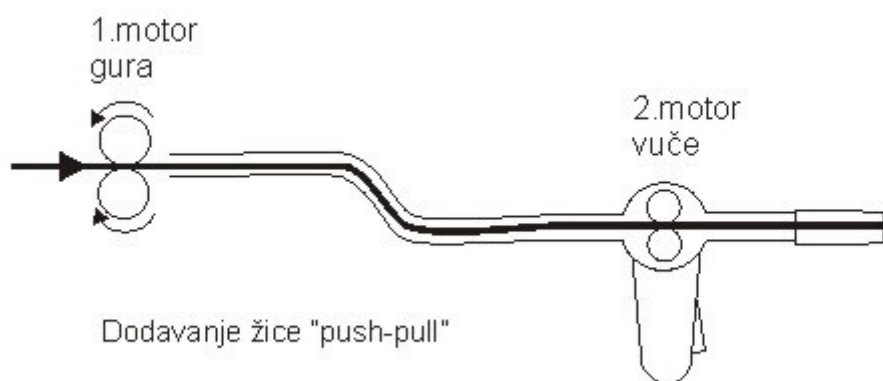
Kod MIG zavarivanja aluminijevih legura javlja se problem provođenja žice (elektrode) kroz pogonski sustav, polikabel i pištolj. Uzrok problema je mala krutost aluminijevih legura (dodatnog materijala, žice) koja se prolaskom kroz pogonski sustav zapetlja ili zaglavi. Kako bi se to spriječilo i omogućilo nesmetano zavarivanje koriste se posebni pogonski sustavi za dobavu žica aluminijevih legura [28].

Push sustav kontroliranom brzinom provodi žicu kroz polikabel pomoću pogonskih kotačića u uređaju za dodavanje žice. Kontrolirana brzina osigurava se elektronički reguliranim istosmjernim motorom, dok se žica vodi i gura kroz kalibrirane utore (specijalni V ili U utor za aluminij) čije dimenzije i oblik ovise o materijalu i promjeru žice. Pogonski sustav se kod kompaktnih uređaja ugrađuje u zajedničko kućište, a kod modularnih uređaja u posebno kućište za dodavanje žice. Ovaj način omogućuje sigurno dodavanje aluminijevih žica promjera 1,2 – 2,4 mm na udaljenostima do 3 m od izvora. Ovaj pogonski sustav dobave žice se danas najčešće koristi u praksi (Slika 17) [29, 30].



Slika 17. *Push* sustav [30]

Drugi sustav kontroliranom brzinom provlači žicu pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice do pogonskih kotačića u pištolju, koji ih „vuče“ do mjesta zavora. U ovom slučaju drugi pogonski motor se nalazi u ručki pištolja, a po svojoj izvedbi može biti električni ili zračni. Prednost ovog sustava je stalna zategnutost žice u vodilici, što omogućuje sigurno dodavanje žica i manjih promjera (0,8 mm) na udaljenostima do 15 m od izvora. Mana ovog postupka je visoka cijena i težina sustava pištolj/kabel, naročito kod jačih struja i većih udaljenosti. Koristi se uglavnom kod zavarivanja aluminija (Slika 18) [29, 30].



Slika 18. Push – Pull sustav [30]

Za MIG zavarivanje aluminijevih legura razvijeni su i posebni pištolji poput *spool* pištolja. *Spool* pištolji se koriste za male promjere aluminijevih žica (0,6 – 1 mm) i za zavarivanje vrlo mekim žicama (npr. AlSi5) također malih promjera (do 0,8 mm) [30].

3.2.3. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi štite mjesto zavarivanja, kapljice rastaljenog metala i talinu od kontaminacije okolnom atmosferom. Za MIG i TIG postupke zavarivanja koriste se inertni plinovi od kojih se za zavarivanje aluminijskih legura jedino koriste argon ili mješavine argona i helija. Utjecaj zaštitnih plinova odražava se na prijenos metala s elektrode na radni komad, metalurške procese u talini zavara i tehnološke procese [18, 21].

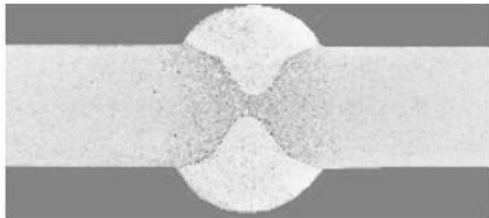

Za zavarivanje aluminijskih legura debljine do 13 mm najčešće se upotrebljava 100 % argon. Argon je jedan od najgušćih inertnih plinova te može ostvariti stabilan električni luk bez rasprskavanja. Koristi se i za ručno i za automatsko zavarivanje. Značajno je jeftiniji od helija, proizvodi miran, tih i stabilan električni luk, te daje uži i glađi zavar zbog svoje niske toplinske vodljivosti. Korištenjem argona kao jedinog zaštitnog plina, unosi se najmanje topline u materijal, pa je ujedno i brzina zavarivanja najniža. Zbog toga postoji opasnost od nastanka poroznosti na debljim komadima. Također, nakon zavarivanja pod zaštitom argona može nastati crna čađa na površini zavara koja se lako uklanja ribanjem čađave površine sa četkom od nehrđajućeg čelika. Kod zavarivanja materijala većih debljina, gdje se zahtjeva veći unos energije za taljenje materijala, najčešće se koriste mješavine 75 % argona / 25 % helija ili 75 % helija / 25 % argona [18].

Helij povećava napon električnog luka do 20 % u usporedbi s argonom, što rezultira širim zavarom, dubljom penetracijom i većim unosom topline. Toplija talina sporije se hladi te omogućuje vodik da difundira iz rastaljenog metala zavara, što čini ovu metodu pogodnom za smanjenje poroznosti. Električnim lukom više temperature postižu se i do tri puta veće brzine zavarivanja nego kod zavarivanja identičnog spoja s argonom. Nedostaci zavarivanja s helijem kao zaštitnim plinom su manja stabilnost električnog luka nego kod argona te njegova visoka cijena. Helij kao zaštitni plin se najviše koristi u mehaniziranim ili automatskim postupcima zavarivanja [18].

Uz pravilan odabir vrste zaštitnog plina, bitna stavka kod upotrebe zaštitnih plinova je i njihova čistoća. Čistoća značajno utječe na kvalitetu zavara, pa se od zaštitnih plinova očekuje minimalna čistoća od 99,998 % i niska razina vlage.

U tablici 11. prikazani su utjecaji argona i helija na svojstva zavora.

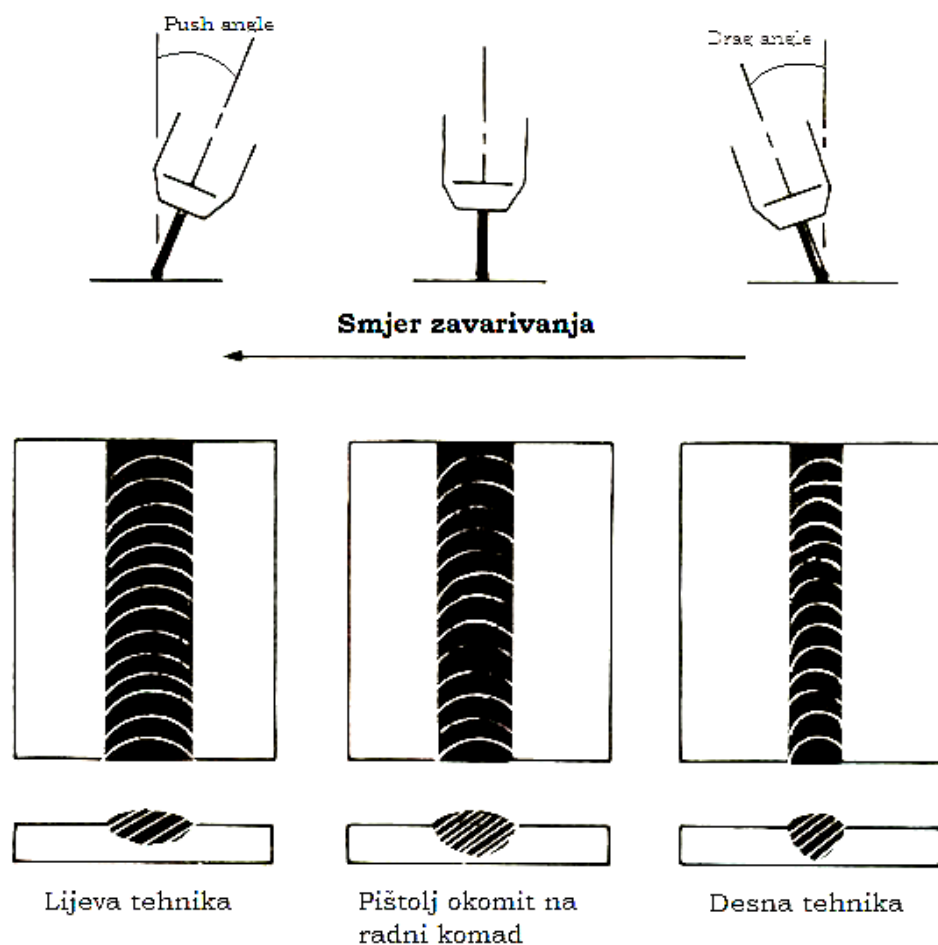
Tablica 11. Utjecaj Ar i He na zavar [31]

	 <p>Argon: 20 l/min 280 A / 25 V</p>	 <p>VARIGON® He 70: 38 l/min 285 A / 34 V</p>
Penetracija	uži zavar, slabija penetracija	širi zavar, dublja penetracija
Mehanička svojstva	slab utjecaj	utječe
Brzina zavarivanja	sporije	brže (i do tri puta)
Izgled zavora	svjetliji, čišći, naboran (mogućnost pojave crne čađe)	više čađe, gladak
Stabilnost luka	stabilan i tih	manje stabilan
Poroznost	da (deblji komadi!)	niža (bolje difundiranje vodika)

Napomena: VARIGON je mješavina helija i argona u omjeru 7:3.

3.2.4. Tehnike rada i nagib pištolja za zavarivanje

Veliku ulogu u postizanju pravilnog zavara ima nagib pištolja MIG uređaja (Slika 19). Pri zavarivanju aluminijskih legura potrebno je održavati tzv. *push angle* koji iznosi od 5° do 10° i karakterističan je za lijevu tehniku rada. Zavarivanjem desnom tehnikom, kod koje se koristi *drag angle*, može doći do izostanka zaštitnog plina u talini što će rezultirati površinski crnim ili sivim izgledom zavara [25].



Slika 19. Posljedice pozicije elektrode i tehnike rada na širinu i penetraciju zavara [25]

Pojava onečišćenja na površini ili rubovima zavara moguća je i pri upotrebi dodatnog materijala koji se koristi prilikom zavarivanja. Posebice je očekivana pri korištenju dodatnog materijala iz aluminijske serije 5xxx koja sadrži velik udio magnezija koji pogoduje stvaranju tih onečišćenja. Legura AlMg, koja će se ispitivati u eksperimentalnom djelu rada pripada toj seriji. Onečišćenja se mogu izbjeći postavljanjem boljih parametara zavarivanja i promjenom tehnike rada.

3.3. Aditivna proizvodnja aluminijskih legura električnim lukom i žicom (WAAM)

Aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing*, AM) proces je izrade različitih oblika predmeta nanošenjem čestica materijala u tankim slojevima, najčešće sloj na sloj. Opisan način izrade naziva se aditivnom proizvodnjom od 2009. godine prema normi ASTM, a razvio se iz brzih proizvodnja (engl. *Rapid Manufacturing*, RM) prototipova (engl. *Rapid Prototyping*, RP) i kalupa/alata (engl. *Rapid Tooling*, RT) [32].

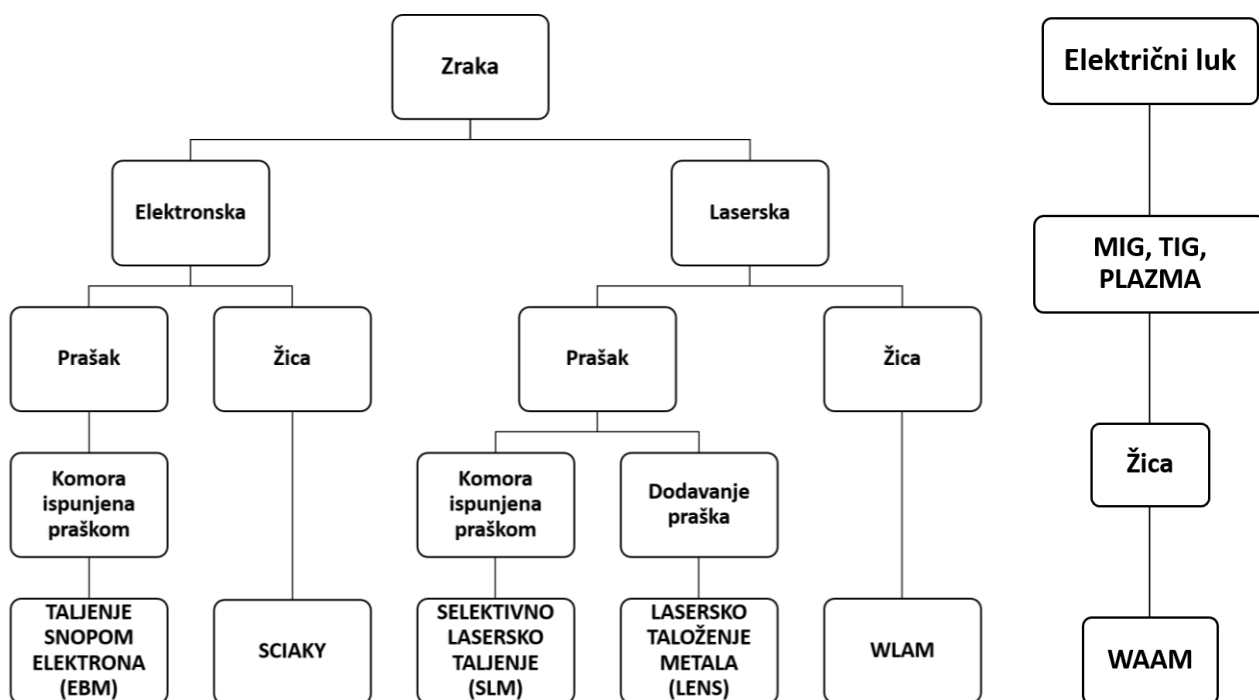
Proces proizvodnje aditivnom tehnologijom započinje konstruiranjem trodimenzionalnog modela računalnim CAD programima za modeliranje ili pohranjivanjem već postojećeg objekta trodimenzionalnim skenerima. Izrađeni CAD modeli pretvaraju se preko programskih paketa u STL format koji koristi većina strojeva za aditivnu proizvodnju. Nakon podešavanja parametara i postavki na stroju, kreće izrada horizontalnih poprečnih presjeka sloj po sloj do konačnog proizvoda.

Postupcima aditivne proizvodnje mogu se izraditi dijelovi komplicirane geometrije u relativno kratkom vremenu izravno iz modela. Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi se temelje na dodavanju materijala sloj po sloj. Glavna prednost je efikasan način izrade dijelova od skupih materijala poput titana i nikla i općenito velika fleksibilnost proizvodnje. Ne zahtijevaju planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu, transport između radnih mjesta i sl. Kao i svaki postupak proizvodnje i aditivna proizvodnja ima ograničenja u svojoj primjeni. Jedan od nedostataka je ograničenost uporabe na samo određene materijale. Također, postoje još uvijek razlike u izgledu površine, mehaničkim svojstvima i točnosti dimenzija obratka u odnosu na klasične postupke proizvodnje. Neke od prednosti i nedostataka primjene aditivne proizvodnje prikazani su u tablici 12 [33].

Tablica 12. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje [33]

Prednosti	Nedostaci
Direktna izrada 3D proizvoda bez upotrebe alata ili kalupa	Potrebna naknadna površinska obrada
Izrada dijelova složene geometrije	Mala brzina izrade
Promjena dizajna proizvoda ne uzrokuje dodatne troškove proizvodnje	Nemogućnost kombiniranja materijala
Velika fleksibilnost proizvodnje	Problem s izradom velikih dijelova
Manji gubitak materijala	Potrebna obuka za rad, iskustvo
Brza i jednostavna izrada	Nedovoljno iskorištene mogućnosti alata
Postizanje veće cijene proizvoda kroz funkcionalna poboljšanja	Visoki troškovi sirovine i energije
Manji troškovi montaže	Nepostojanje ekonomije razmjera
Lakši izlaz na tržište	Ponuda proizvoda ograničena je tehnološkom izvedivošću
Nema povećanja troškova pri izradi različitih proizvoda	Nedostatak kvalitetnih standarda

Danas je poznat velik broj aditivnih postupaka izrade metala, a može ih se podijeliti s obzirom na oblik materijala koji koriste i prema izvoru energije (Slika 20).

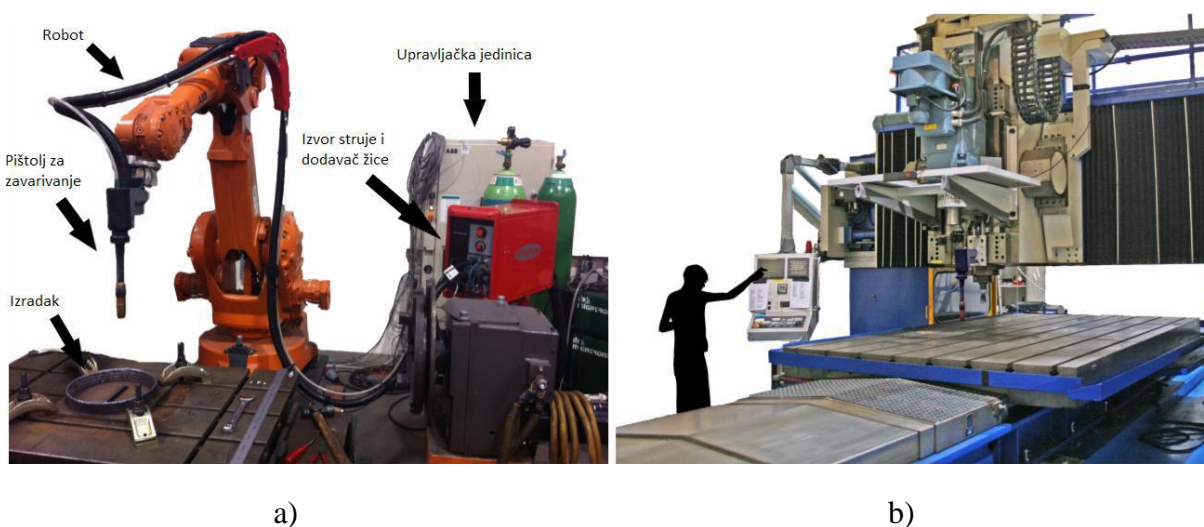


Slika 20. Podjela postupaka aditivne proizvodnje [34]

3.3.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (WAAM)

U procese koji koriste žicu kao dodatni materijal ubrajaju se WAAM (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*), WLAM (engl. *Wire and Laser Additive Manufacturing*) i Sciaky/EBF (engl. *Electron Beam Freeform Fabrication*). Međusobno se razlikuju s obzirom na izvor energije. Laserski izvori su precizni, ali imaju jako malu iskoristivost (2 – 5 %), dok elektronski izvori imaju nešto veću iskoristivost (15 – 20 %), ali zahtijevaju vakuumske uvjete. Za razliku od laserskih i elektronskih izvora, elektrolučni izvori poput MIG-a i TIG-a mogu imati iskoristivost do čak 90 % u određenim uvjetima. Uz to, oprema za elektrolučne izvore je puno jeftinija u odnosu na laserske i elektronske izvore [35].

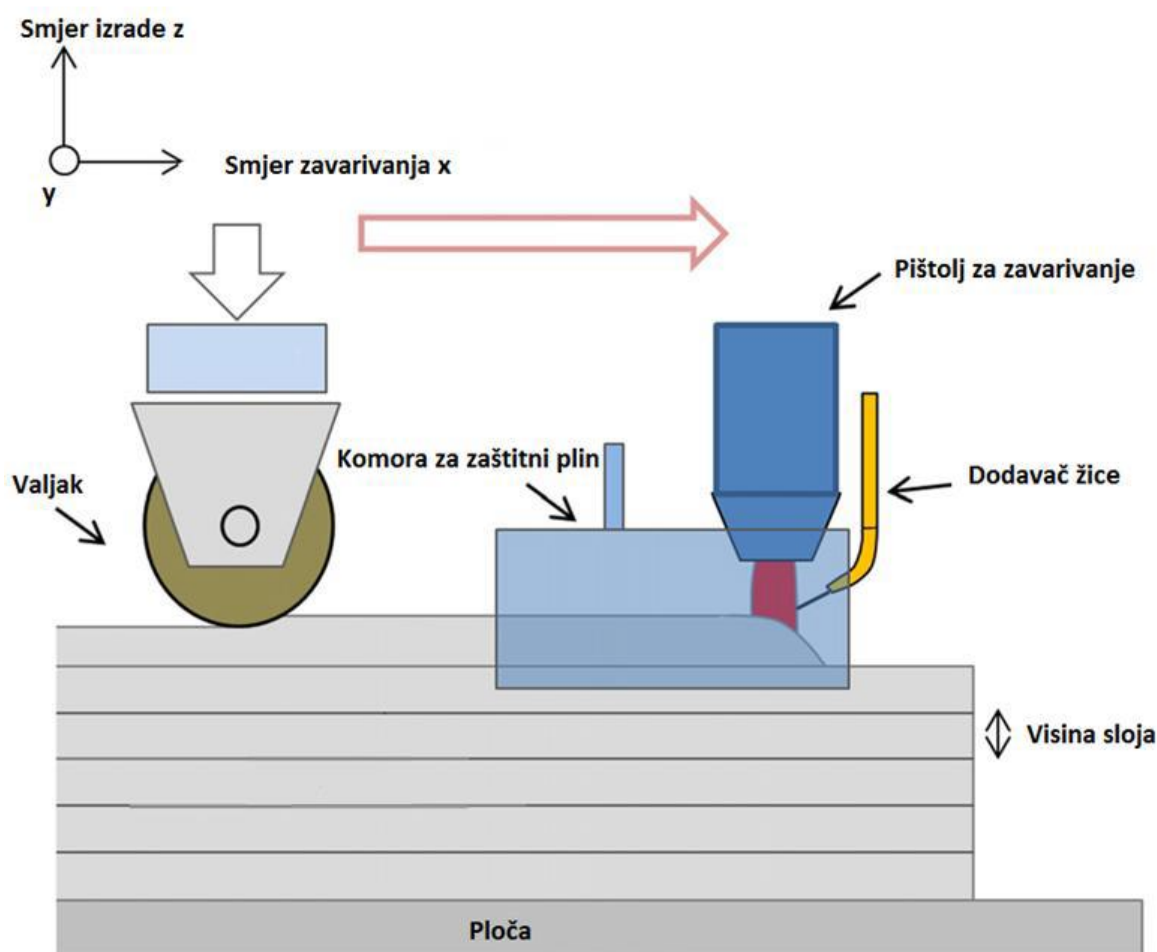
Proizvodnja velikih dijelova i masa do čak 10 kg, moguća je pomoću već spomenutog WAAM-a, odnosno aditivne proizvodnje sa žicom i električnim lukom. Ova relativno nova tehnologija u aditivnoj proizvodnji koristi standardnu opremu za zavarivanje. To su: izvor struje za zavarivanje (osigurava električni luk koji tali žicu), pištolj za zavarivanje, automatski dodavač žice (upravlja količinom depozita) te robota ili CNC stroj (Slika 21.a i 21.b) koji osigurava gibanje po zadanoj putanji. Ovisno o materijalu s kojim se zavaruje i masi depozita po satu, najčešće se koriste impulsni MIG izvor, CMT (*Cold Metal Transfer*), TIG izvor i plazma zavarivanje. TIG postupak generira neznatno štrcanje i rastaljeni metal je manje aktivan, što je poželjno prilikom taloženja materijala različitih kemijskih sastava. Plazma zavarivanje se najčešće koristi kod zavarivanja titana i kao kod TIG postupka potrebni su dodavači žice, dok je kod MIG postupka zavarivanja dodatni materijal sastavni dio procesa.



Slika 21. a) robot za zavarivanje sa šest SSG; b) CNC portalni stroj za zavarivanje [34]

WAAM postupak se temelji na taloženju dodatnog materijala sloj po sloj pomicanjem električnog luka i dodavanjem žice pomoću robota (Slika 22). Ovisno o vrsti materijala koji se taloži, ponekad postoji potreba za stvaranjem dodatne zaštitne atmosfere. Za materijale kao što su aluminij i čelik, zaštitni plin koji dolazi kroz sapnicu pištolja za WAAM zavarivanje je dovoljan. Međutim, kod materijala otpornih na visoke temperature kao npr. titana, potrebna je dodatna zaštitna oprema. Od dodatne zaštitne opreme, koriste se lokalni uređaji koji moraju biti na malim udaljenostima od mjesta zavarivanja i komore, šatori za postizanje inertne atmosfere [35].

Prilikom WAAM procesa kapljice metala se talože jedna do druge u slojevima. Rezultat takvog taloženja je zid čija najmanja širina iznosi od 1 mm do 2 mm. Metalni zid uključuje i blage valovitosti u svom izgledu koje su rezultat slojevitog nanošenja materijala. Te valovitosti moraju se ukloniti naknadnim procesima obrade kako bi se spriječile površinske nepravilnosti. Prilikom zavarivanja koriste se i valjčići za valjanje između slojeva kako bi se mehaničkom deformacijom poboljšala mikrostruktura svojstva svakog sloja [35].



Slika 22. Dodatna oprema za WAAM [36]

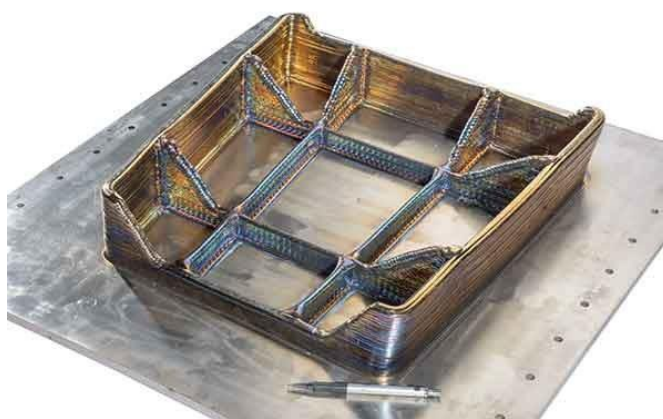
3.3.2. Prednosti i nedostaci WAAM postupka

Prednosti koji se ostvaruju korištenjem WAAM postupka su [34]:

- korištenje velikog broja materijala, mogućnost izrade komponenti od skupih materijala kao što su nikal, titan i njihove legure
- mogućnost automatizacije proizvodnog procesa čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad
- proizvodnja komponenti sa složenom geometrijom, koje se ne mogu napraviti klasičnim postupcima obrade
- smanjenje gubitka materijala, glavna prednost WAAM-a je tzv. *Buy To Fly* (BTF) omjer koji pokazuje koliko je potrebno pribaviti materijala da bi se od njega izradio traženi dio
- velika količina depozita, moguće je izračunati efikasnost nanošenja depozita (9) iz izračunate iskoristive površine (B1) i površine koja se uklanja naknadnom obradnom (B2). Iz efikasnosti nanošenja depozita može se procijeniti da li je postupak optimalan ili je potrebno promijeniti parametre zavarivanja za postizanje manjih količina materijala koji mora biti uklonjen

$$\text{Efikasnost nanošenja depozita} = \frac{B1}{B1 + B2}, \% \quad (9)$$

- niži troškovi proizvodnje, relativno mala investicija
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- nema ograničenja u veličini dijela
- mogućnost primjene izvora struje i manipulatora različitih proizvođača.



Slika 23. Prednost WAAM postupka - proizvodnja komponenti sa složenom geometrijom [35]

Kao i svaka tehnologija, tako i WAAM postupak uz prednosti ima i nedostatke. Glavni nedostaci WAAM postupka uzrokovani su visokim unosom topline zbog čega se pojavljuju zaostala naprezanja koja uzrokuju lošija mehanička svojstva komponenti i deformacije koja dovode do poteškoća pri postizanju zahtijevanih tolerancija. Kako bi se što više reducirali navedeni problemi postoje radnje prije, za vrijeme i nakon taloženja.

U radnje prije taloženja ubrajaju se: optimiranje parametara, način učvršćivanja podloge i optimizacija taloženja metala sloj po sloj. Najveći utjecaj na smanjenje deformacija ima učvršćivanje podloge zavarivanja i način taloženja [34].

Radnje za vrijeme taloženja služe za smanjenje deformacija i naprezanja. Deformiranje podloge prilikom izrade zida sprječava se taloženjem materijala s obje strane podloge čime se postiže i jednolikiji izgled izrađenog zida. Međutim, tako dobivena uravnotežena komponenta ima utjecaj na smanjenje deformacija, ali ne i zaostalih naprezanja. Zaostala naprezanja se uklanjaju optimizacijom vremena hlađenja i *online* valjanjem.

Optimizacija vremena hlađenja podrazumijeva pravilan odabir vremena tijekom kojeg će se postojeća toplina koristiti za predgrijavanje prije nanošenja sljedećeg sloja. To se u većini slučajeva postiže paralelnim nanošenjem slojeva radi poboljšanja učinkovitosti procesa i nadoknade vremena za hlađenje zida. Drugi način uklanjanja zaostalih naprezanja, *online* valjanje, koristi hidraulički cilindar koji osigurava pritisak valjka na nanosi sloj. Osim na smanjenje naprezanja, valjanje ima pozitivan utjecaj i na mikrostrukturu [34].

Nedostaci WAAM postupka su [34]:

- visoka zaostala naprezanja – smanjuju mehanička svojstva materijala
- nedostatak iskustva sa ovakvom tehnologijom
- teško praćenje parametara zavarivanja
- samo jednostavne konstrukcije
- deformacije dijelova – poteškoće u postizanju zadanih tolerancija
- pojava grešaka: poroznosti (zbog nedovoljnog protoka plina, nečistoća zaštitnog plina ili materijala, pogrešnih parametara), ugorine (zbog prevelike struje zavarivanja, prevelike brzine zavarivanja, pogrešnog kuta zavarivanja, lošeg dodavanja žice), nadvišenja (zbog prevelike brzine zavarivanja)
- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica
- nedostatak iskustva sa ne razornim ispitivanjima ovakvih konstrukcija.

3.3.3. Materijali kod WAAM postupka

Danas postoji velik broj materijala koji se koriste kod WAAM postupka, ali najviše se primjenjuju oni na bazi željeza, titana i aluminija. Cilj primjene pojedinog materijala za izradu komponente WAAM postupkom je postići željen oblik komponente sa zadovoljavajućim mehaničkim svojstvima i bez grešaka u strukturi. Osim pojedinačne uporabe materijala, ovim aditivnim postupkom moguće je kombinirati i različite metalurški kompatibilne materijale. Među poznatijim kombinacijama su: ugljični i visokočvrsti čelik, bakar i legura čelika s niklom, poznata pod nazivom invar i drugi. Tablicom 13. prikazani su materijali koji se najčešće primjenjuju kod WAAM postupka [37].

Tablica 13. Materijali koji se koriste kod WAAM postupka [37]

Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024,2319,4043,5087
Čelik	volfram, molibden, tantal, nelegirani i niskolegirani (ER60, ER80, ER90, ER120), martenzitni (250 i 350), nehrđajući (316L, 17-4 PH)
Inconel	625 , 718

Titan i njegove legure imaju široku primjenu u zrakoplovnoj industriji. Jedna od najčešće korištenih legura titana je Ti6Al4V koja spada u $\alpha - \beta$ leguru. Ona se često koristi kod izrade trupa i motora aviona aditivnim postupkom jer dovodi do značajnih ušteda u materijalu i vremenu izrade. Ovu leguru karakteriziraju različite vrijednosti vlačne čvrstoće i produljena u različitim smjerovima. Zahvaljujući svojim karakteristikama prilikom skrućivanja, aditivno proizvedene komponente imaju izdužena zrna i dobru teksturu mikrostrukture što rezultira većom čvrstoćom u smjeru paralelnom na slojeve. Problem koji se javlja kod ove legure je izdužena grubozrnata struktura, a rješava se prethodno spomenutim *online* valjanjem kojim se usitnjavaju zrna i postižu bolja mehanička svojstva. Za zavarivanje titana najčešće se koriste TIG ili plazma postupci zavarivanja. Prilikom zavarivanja potrebno je osigurati potpuno inertnu atmosferu, a to se postiže uporabom komore, šatora ili lokalnog uređaja.

Kod aditivne proizvodnje aluminija i njegovih legura treba obratiti pozornost na stvaranje pora i mogućih pukotina u materijalu. Da bi se izbjegli mogući problemi radi se kontrola mikrostrukture, koristi se kvalitetna i dobro skladištena žica, naknadna toplinska obrada te se kao i kod titanovih legura primjenjuje valjanje između slojeva. Uz navedene karakteristike prilikom korištenja aluminija i aluminijevih legura u WAAM postupku potrebno je slijediti i osnovne smjernice kao kod zavarivanja aluminija [37]:

- odmastiti i očistiti površinu prije prvog prolaza
- koristiti odgovarajuću tehnologiju za zavarivanje aluminija
- izabrati pravilne parametre zavarivanja
- ukoliko ima nečistoća i između prolaza očistiti zavar
- optimalna međuprolazna temperatura.

Na izgled i svojstva nanesenih prolaza najviše utječu parametri zavarivanja. Ukoliko se koristi visoka struja dolazi do prevelikog unosa topline, talina se slijeva te dolazi do prevelikog širenja zida bez porasta visine. S druge strane, ako je struja za zavarivanje manja od potrebne dolazi do naljepljivanja sloja na sloj i dobivena struktura nije adekvatna. Brzina zavarivanja također utječe na izgled kao i parametri: mala brzina povećava unos topline te dolazi kao i kod prevelike struje do širokog zavora, a kod prevelike brzine dolazi do naljepljivanja. Fenomen naljepljivanja je posebno izražen kod zavarivanja aluminija i njegovih legura zato što aluminij odlično provodi toplinu i talina nema dovoljno vremena da na rubovima rastali prethodni sloj.

3.3.4. Primjena WAAM postupka

WAAM postupak koristi se za izradu srednjih do velikih dijelova (> 400 mm) od različitih vrsta materijala. Primjenjuje se u raznim industrijama, uključujući zrakoplovnu i automobilsku industriju, brzu izradu alata, itd.

U zrakoplovnoj industriji mnoge komponente za zrakoplov su izrađene iz blokova materijala što dovodi do velikog gubitka materijala. Kako bi bilo što manje otpada materijala i zagađenja okoliša danas se zahtjeva što niži BTF omjer. Taj omjer (10) se definira kao omjer volumena ili mase početnog sirovca V_i prije obrade i volumena ili mase proizvoda V_f nakon obrade kao što prikazuje jednačba [34]:

$$BTF = \frac{V_u}{V_i} \quad (10)$$

Jedna od prednosti WAAM postupka je što ima mali BTF omjer pa se upravo zbog toga često koristi u industrijama gdje se izrađuju složene geometrije od skupih materijala. Osim malog BTF omjera, zrakoplovna industrija najviše koristi titan i njegove legure iz razloga što proizvođači sve više upotrebljavaju ugljična vlakna koja nisu kompatibilna s aluminijem. Titan je kompatibilan s ugljičnim vlaknima i zamjenjuje aluminij u mnogim primjenama te se predviđa njegova sve veća primjena u budućnosti [34, 35]. Automobilska industrija koristi WAAM kao uspješan alat u konstrukciji i izradi prototipa automobilskih komponenti jer se time znatno skraćuje vrijeme razvoja i smanjuju troškovi proizvodnje, kao i troškovi samog proizvoda. Industrija alata primjenjuje WAAM za izradu funkcionalnih komponenti alata [34].

Cijena dijela napravljenog s WAAM postupkom u većini slučajeva ima manju cijenu od obrade dijela odvajanjem čestica, ova razlika pogotovo postaje vidljiva kada se usporede dijelovi od skupih materijala. WAAM postupak omogućuje decentraliziranu proizvodnju dijelova od raznih vrsta materijala kao što su čelici, aluminij i legure, titan i legure, bakar i drugi. Danas kada je cilj smanjiti vrijeme proizvodnje, a kod skupljih materijala i njihovu cijenu ovakva tehnologija daje optimalna svojstva [34].

Sljedećim primjerima (Slika 24) prikazani su neki dijelovi napravljeni WAAM tehnologijom.



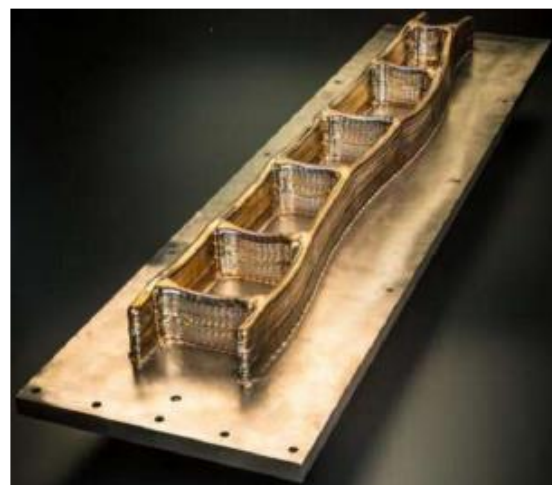
Čelični stožac



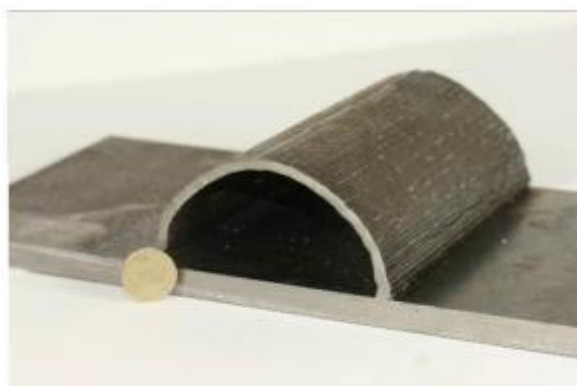
Rotor



Model krila zrakoplova



Konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V



Polukružna konstrukcija

Slika 24. Primjene WAAM postupka [35]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

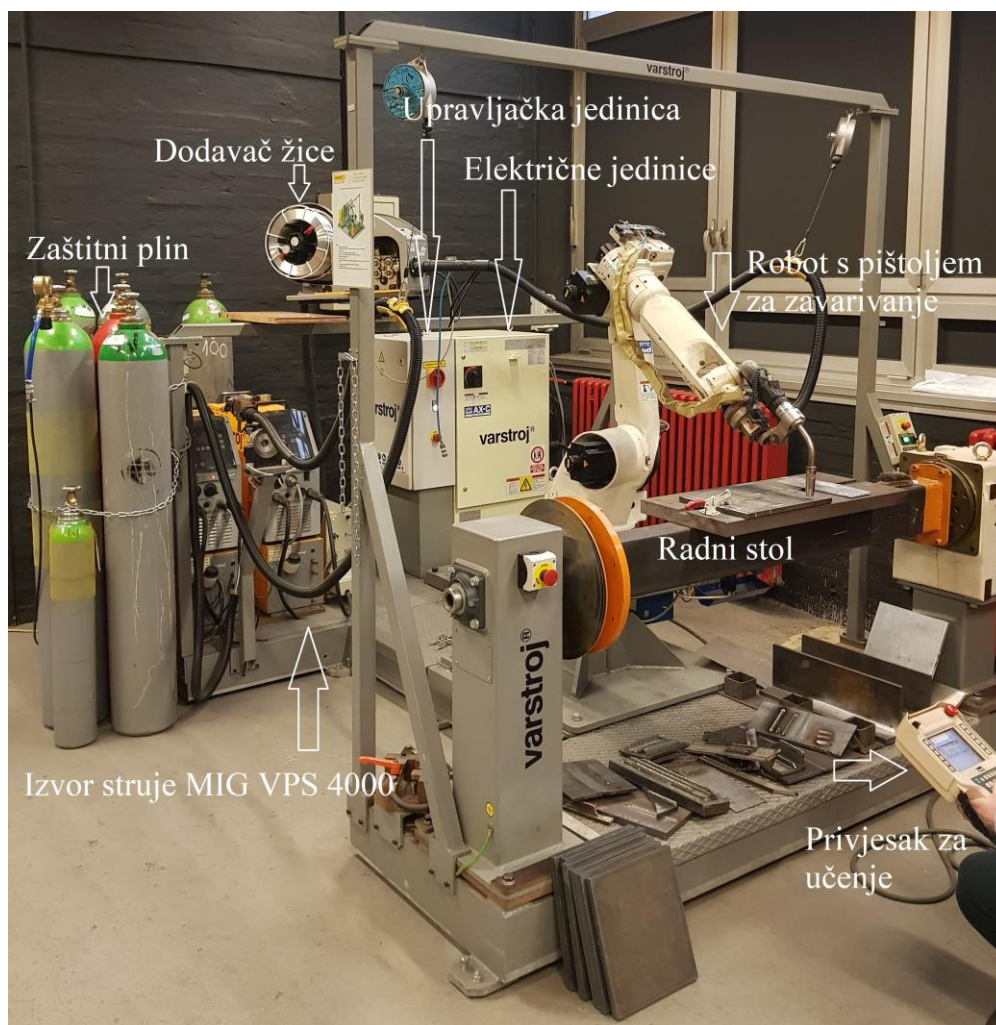
Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. WAAM postupkom izrađena su dva zida visina 50 mm sa različitim parametrima zavarivanja. Zavarivanje zidova je izvedeno MIG postupkom pomoću robotske stanice s ciljem ispitivanja utjecaja parametara zavarivanja na stabilnost procesa, produktivnost i geometrijske značajke slojeva. Nakon izrade zidova, izrezani su uzorci na kojima se mjerila tvrdoća i analizirala geometrija koja je postignuta ovom tehnologijom zavarivanja.

Eksperiment se odvijao prema ovom redoslijedu: priprema podloge za zavarivanje i unošenje parametara zavarivanja u robotsku stanicu, izrada zidova impulsnim strujama te priprema uzoraka za ispitivanje i analiza dobivenih rezultata.

4.1. Oprema za zavarivanje

Izrada zidova WAAM postupkom provedena je na robotskoj stanici Almaga OTC AX V6 koja je prikazana slikom 25. Robotska stanica nalazi se u Laboratoriju za zavarivanje i njezin glavni dio čini robot koji se sastoji od šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Na vrhu robotske glave montiran je pištolj za zavarivanje kojem se žica automatski dodaje preko dodavača žice. Tehnološki parametri i putanje gibanja pištolja za zavarivanje unose se u upravljačku jedinicu robotske stanice pomoću privjeska za učenje. Privjesak za učenje s ručno upisanim programom prikazan je na slici 26.

Parametri zavarivanja određeni su nakon proučavanja literature koja se bavi problematikom WAAM zavarivanja aluminijskih legura i nakon nekoliko probnih prolaza koji su napravljeni prije konačne izrade zidova. Od postupaka za zavarivanje koristilo se MIG impulsno zavarivanje koje je omogućeno izvorom struje tvrtke OTC Daihen DP 400 čije su karakteristike prikazane tablicom 14. Zavarivanje se provodilo na osnovnoj aluminijskoj ploči dimenzija 300 x 200 x 10 mm uz prethodno brušenje ploče ručnom brusilicom radi uklanjanja površinskih nečistoća. Nakon brušenja, uslijedilo je pozicioniranje i stezanje ploče za stol pozicionera robota. Ploča je čvrsto stegnuta sa četiri strane pomoću četiri stege kako se prilikom zavarivanja i kasnijeg hlađenja ne bi deformirala i savijala. Način stezanja i izgled osnovne ploče na kojoj su se izrađivali aluminijski zidovi prikazana je slikom 27.



Slika 25. Robotska stanica Almega OTC AX V6



Slika 26. Privjesak za učenje



Slika 27. Pozicioniranje i stezanje osnovne ploče

Tablica 14. Karakteristike izvora struje DP 400 [38]

Izvor struje		DP 400
Priključni napon, V/Hz		3 – 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 – 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 – 34
Intermitencija, A	100 %	283
	50 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		45
Dimenzije (D x Š x V), mm		635 x 300 x 595

4.2. Odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina

Kao dodatni materijal za izradu zidova, koristila se puna aluminijska žica AlMg5 (prema HRN EN ISO 18723) promjera 1,2 mm i namotana na kolut. Ova žica za MIG zavarivanje legirana je s 5 % magnezija i namijenjena je za zavarivanje AlMg i AlMgSi legura. Metal zavara koji se postiže korištenjem ove žice relativno je visoke čvrstoće i korozijski je postojan u morskoj atmosferi. Kemijski sastav dodatnog materijala dan je tablicom 15, a mehanička svojstva su prikazana tablicom 16.

Tablica 15. Orijentacijski kemijski sastav čistog metala zavara uporabom AlMg5 žice [39]

Orijentacijski kemijski sastav, %						
	Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
%	ostatak	5	0,15	0,1	0,05	0,15

Tablica 16. Mehanička svojstva čistog metala zavara uporabom AlMg5 žice [39]

Mehanička svojstva čistog metala zavara		
Granica elastičnosti, R_{eL} , MPa	Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	Istezanje, A_5 [%]
120	260	> 25

Prilikom izrada zidova pokazalo se koliko je aluminij nezahvalan materijal za zavarivanje. Nekoliko puta je došlo do zaglavljenja žice zbog predugačkog polikabela pištolja za zavarivanje, nakon čega se zaustavljao proces zavarivanja, izvlačila zaglavljena žica i stavljala nova. Također, zbog aluminijeve velike sklonosti oksidaciji, nakon svakog prolaza se odrezivao kraj žice i čistila površina zavara.

Kao zaštitni plin koristio se argon čistoće 4.8 proizvođača Messer (Slika 28). Razlog korištenja argona kao zaštitnog plina je njegova inertnost koja određuje kvalitetu zavarenog spoja. Osim dobre kvalitete zavara, argon omogućuje stabilan električni luk, manje štrcanje, uži profil zavara i ljepši izgled zavara. Za izradu oba zida protok plina je iznosio 21 l/min.



Slika 28. Zaštitni plin – Argon 4.8 i protok zaštitnog plina

4.3. Parametri zavarivanja

Optimalni parametri zavarivanja dobiveni su probnim zavarivanjima prije početka eksperimenta. Nakon brojnih pokušaja i postizanja različitih debljina, visina i kvaliteta zavora, utvrđeni su konačni parametri. Zadatak završnog rada bio je izraditi dva zida duljine 300 mm, širine do 10 mm i visine 50 mm sa što različitim brzinama i strujama zavarivanja, a da pritom zidovi imaju zadovoljavajuću kvalitetu i što sličnije dimenzije.

Za izradu prvog zida odabrani su sljedeći parametri:

- struja: 110 A
- napon: 20 V
- brzina zavarivanja: 75 cm/min.

Za izradu drugog zida odabrani su sljedeći parametri:

- struja: 190 A
- napon: 20 V
- brzina zavarivanja: 150 cm/min.

Tijekom izrade zidova, očitavani su parametri zavarivanja, mjerene su među prolazne temperature te visine i širine zidova nakon svakog prolaza. Zidovi su izrađivani s obje strane, jedan prolaz s lijeva, drugi s desna. Temperatura se mjerila beskontaktnim infracrvenim termometrom Fluke IR u tri točke zida. Slobodni kraj žice za svaki prolaz iznosio je oko 13 mm, dok je nagib pištolja za zavarivanje čitavo vrijeme bio u neutralnom položaju. Očitani parametri zavarivanja i dimenzije po slojevima prvog zida prikazani su u tablici 17, a drugog zida u tablici 18.

Unos topline računao se prema sljedećem izrazu (11), [40]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad (11)$$

Gdje je:

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (prema normi HRN EN 1011-1 za MIG postupak iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min.

Napomene uz tablicu 17 i 18. :

- Zid 1: nakon 29 prolaza došlo je do probijanja bužira unutar polikabela i curenja vode usred zavarivanja, eksperiment se nastavio nakon zamijene polikabela tjedan dana poslije (u tablici 17. obustava zavarivanja označena je crnom crtom, između 29 i 30 prolaza)
- Zid 2: kontaktna vodilica se rastalila nakon 32 prolaza, a žica se zaglavila nakon 39 i 43 prolaza

Tablica 17. Parametri zavarivanja i dimenzije zida 1 nakon svakog prolaza

Prolaz	Vrijeme	Očitana struja A	Očitani napon V	Temperatura, °C			Širina zida mm	Visina zida mm	Unesena toplina kJ/cm
				Lijevo	Sredina	Desno			
1	12:07	115	19	55	55	59	5	3	1,40
2	12:10	116	20	83	75	77	5,5	4,8	1,48
3	12:14	118	20	89	85	92	6,4	5,6	1,51
4	12:17	119	20	93	86	88	7	6,9	1,52
5	12:21	120	20,3	85	87	101	7,7	8	1,56
6	12:25	119	20,4	90	94	98	8	9,5	1,55
7	12:28	120	20,3	102	105	108	8	12	1,56
8	12:32	119	20,1	110	104	121	8	12,5	1,53
9	12:35	121	20,2	112	114	117	8	13,4	1,56
10	12:39	120	20	102	106	124	8,1	14	1,54
11	12:44	119	19	119	116	111	8,16	15,3	1,45
12	12:48	119	19	105	101	122	8,2	16,5	1,45
13	12:51	118	18	131	118	124	8,7	17,8	1,36
14	12:55	118	19	120	118	133	8,8	18,3	1,43
15	12:59	117	19	118	132	112	9	20	1,42
16	13:04	118	19	109	123	130	9	21,1	1,43
17	13:09	117	20	116	128	133	10	22,5	1,50
18	13:13	118	20	108	112	122	10	23,6	1,51
19	13:16	117	20	142	133	120	10	25	1,50
20	13:20	116	20	116	136	144	10	26,7	1,48
21	13:24	117	18	129	127	136	10	29,7	1,35
22	13:26	116	19	129	134	144	10	31	1,41
23	13:29	116	18,7	132	139	134	10	32,4	1,39
24	13:34	117	19	143	142	131	10	33,5	1,42
25	13:37	118	20	139	137	154	10	34	1,51
26	13:40	118	20,2	122	143	161	10	34,5	1,53
27	13:43	117	20	131	144	158	10	35,8	1,50
28	13:47	118	19,8	138	149	143	10	37	1,50
29	13:51	-	-	-	-	-	-	-	-
30	12:56 (8d)	117	20	102	103	155	8,9	32	1,50
31	12:59	118	19,5	112	115	165	8,9	33,2	1,47
32	13:02	115	19,7	112	114	190	9,3	34,9	1,45
33	13:05	117	19,4	153	131	189	9,3	36,7	1,45
34	13:08	116	19,7	127	126	211	9,3	38	1,46
35	13:10	115	19,8	153	131	185	9,8	39	1,46
36	13:13	116	19,7	132	142	202	9,8	40,5	1,46
37	13:15	117	19,8	152	141	195	9,8	41,6	1,48
38	13:18	117	16,6	143	152	245	9,8	43,5	1,24
39	13:20	117	19,5	149	150	207	9,8	44	1,46
40	13:23	117	19,7	150	145	204	10	45,6	1,48
41	13:26	115	19,9	180	143	232	10	46,7	1,46
42	13:28	116	19,3	157	159	243	10	47,4	1,43
43	13:31	117	19,6	141	151	220	10	48,5	1,47
44	13:35	116	19,7	150	142	217	10	49,4	1,46
45	13:37	118	19,5	187	152	242	10	49,9	1,47
46	13:39	116	19,7	142	153	258	10	51	1,46

Tablica 18. Parametri zavarivanja i dimenzije zida 2 nakon svakog prolaza

Prolaz	Vrijeme	Očitana struja A	Očitani napon V	Temperatura, °C			Širina zida mm	Visina zida mm	Unesena toplina kJ/cm
				Lijevo	Sredina	Desno			
1	8:21	212	22,8	70	75	80	4,80	1,52	1,55
2	8:25	210	21	73	75	73	6,70	3,00	1,41
3	8:30	205	23	81	91	72	7,10	4,10	1,51
4	8:33	209	23	99,2	98	103			1,54
5	8:36	207	23	103	112	119	8,00	5,50	1,52
6	8:38	206	23	102	105	112	8,20	6,40	1,52
7	8:40	204	22	108	111	121	8,60	7,50	1,44
8	8:43	201	23,8	123	118	127			1,53
9	8:45	200	23,5	129	124	123	8,60	10,50	1,50
10	8:48	202	23,6	113	116	129			1,53
11	8:51	204	23,4	120	122	118	8,70	11,50	1,53
12	8:53	205	23,5	126	129	134			1,54
13	8:55	200	23,7	128	130	141	8,70	14,00	1,52
14	8:57	202	22,8	124	135	149			1,47
15	9:00	200	23,4	133	130	145	8,70	16,00	1,50
16	9:02	204	24	135	137	140			1,57
17	9:03	202	23,4	141	142	160	8,80	18,20	1,51
18	9:05	201	23,7	143	143	155			1,52
19	9:07	204	21	127	136	193			1,37
20	9:10	203	23	135	142	177	8,80	20,00	1,49
21	9:13	204	23,5	129	138	185			1,53
22	9:15	202	23,4	145	149	200			1,51
23	9:17	196	24,1	140	149	193	9,00	23,00	1,51
24	9:19	204	23,4	139	142	188			1,53
25	9:24	203	22	135	142	175			1,43
26	9:25	201	23,5	141	142	189	9,00	26,00	1,51
27	9:28	198	23,5	169	153	194			1,49
28	9:29	196	23,5	151	164	223			1,47
29	9:31	205	23,3	144	156	202			1,53
30	9:34	204	22	148	168	231	9,23	30,00	1,44
31	9:36	194	21	110	121	148			1,30
32	9:43	207	24,3	108	113	132	9,30	32,00	1,61
33	10:16	206	23	91	102	131			1,52
34	10:18	206	22,8	119	119	139	9,30	33,20	1,50
35	10:20	198	23,4	124	142	196			1,48
36	10:23	205	23,3	141	150	223			1,53
37	10:25	200	22	150,8	162	239			1,41
38	10:27	204	23,2	148	156	256	9,41	37,00	1,51
39	10:30	203	22	156	165	223			1,43
40	10:33	204	23	144	159	247	9,42	39,00	1,50
41	10:36	204	23	122	131	188			1,50
42	10:40	203	24	133	138	201			1,56
43	10:53	198	23,7	129	142	220	9,44	40,00	1,50
44	10:57	180	24	132	138	194			1,38
45	11:08	178	25	104	134	212		42,00	1,42
46	11:13	208	22,4	115	149	220			1,49
47	11:15	207	23	120	169	237	9,47	44,90	1,52
48	11:18	192	22,5	156	176	257			1,38
49	11:21	194	22,7	174	146	238			1,41
50	11:24	192	23	137	158	254	9,48	47,40	1,41
51	11:26	194	22,7	162	174	254			1,41
52	11:28	198	22,5	162	173	245		49,00	1,43
53	11:33	192	22,9	156	152	232	9,50	50,00	1,41

4.4. Tijek izrade aluminijevih zidova WAAM postupkom

Nakon čišćenja alkoholom i brisanja osnovne ploče suhom krpom, uslijedilo je zavarivanje prvog zida. Već nakon prva dva prolaza došlo je do problema s dodavanjem žice usred zavarivanja i nepravilnosti u izgledu zavora (Slika 29).



Slika 29. Nepravilnost zavora nastala uslijed nepravilnog dovoda žice

Greška napravljena u prethodnom prolazu, uočavala se i nakon idućih par nanosa dodatnog materijala (Slika 30).



Slika 30. Nepravilnost zavora pri izradi zida 1

Greška se prekrila novim slojevima dodatnog materijala i zavarivanje je teklo bez poteškoća (Slika 31).



Slika 31. Tijek izrade prvog zida – pogled sprijeda i s boka

Nakon 29. prolaza došlo je do probijanja bužira unutar polikabela te je usred zavarivanja iz pištolja počela curiti voda za hlađenje pištolja, što je dovelo do većeg narušavanja kvalitete i izgleda dotada izrađenog zida 1 (Slika 32).

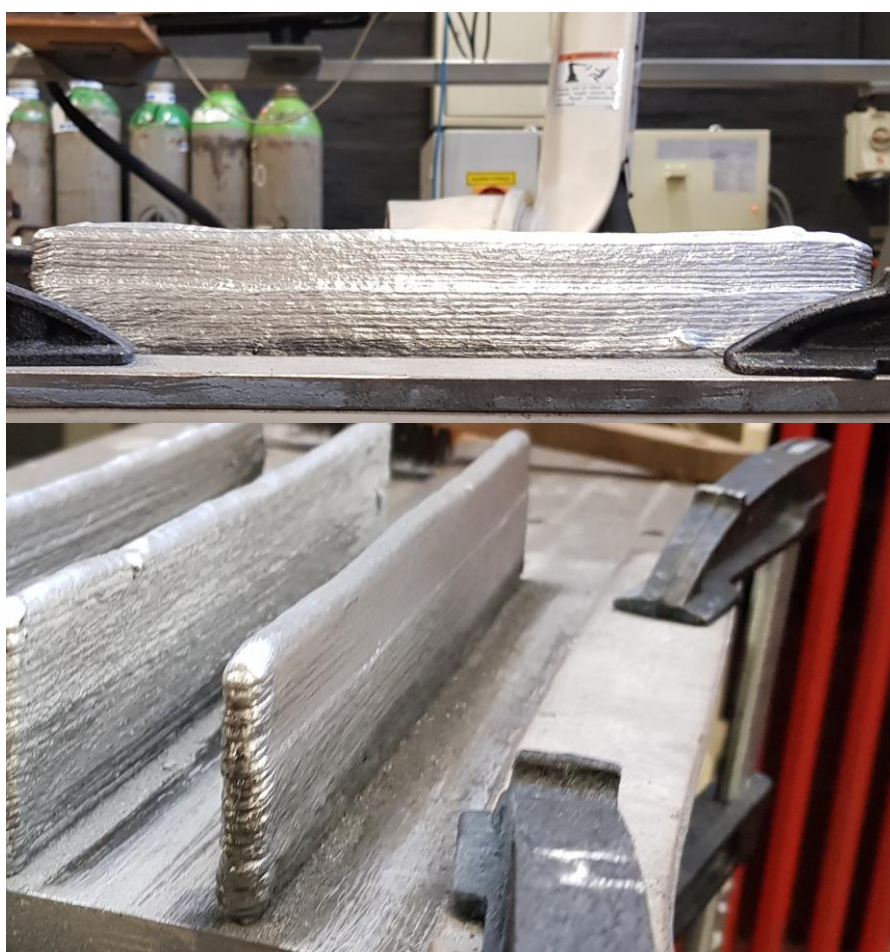


Slika 32. Novi problemi uzrokovani oštećenjem bužira

Nakon zamjene polikabela, bilo je potrebno prepraviti oštećeni zid brušenjem uništenih slojeva i nastaviti zavarivanje sloj po sloj do konačnih dimenzija prvog zida (Slika 33 i 34).



Slika 33. Nastavak izrade prvog zida nakon brušenja oštećenih slojeva



Slika 34. Izrađen zid 1. – pogled sprijeda i s boka

WAAM tehnologijom izrađen je zid 1. visine 50 mm i širine 10 mm (nešto većih dimenzija i nepravilnijeg izgleda zbog prethodno nastalog oštećenja).

Drugi zid izrađen je većom jakosti struje i većom brzinom zavarivanja. Prvi prolaz prikazan je slikom 35. Jači parametri rastalili su nekoliko puta kontaktnu vodilicu, pa se izrada drugog zida zaustavljala radi njezine zamjene s novom. Od ostalih problema, došlo je do zaglavljenja žice (elektrode), no nakon drugačijeg pozicioniranja polikabela problemi se više nisu pojavljivali do kraja izrade drugog zida (Slika 36).



Slika 35. Prvi prolaz drugog zida



Slika 36. Izrađen zid 2. – pogled sprijeda i s boka

4.5. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon završetka zavarivanja zidova izrađeni su ispitni uzorci iz osnovne ploče na kojoj se odvijalo zavarivanje. Zidovi su odvojeni od osnovne ploče pomoću plazma rezačice, dok su uzorci izrezani iz zidova tračnom pilom uz hlađenje emulzijom. Razlog zašto se i uzorci nisu rezali plazma rezačicom je preveliki unos topline koji bi mogao negativno utjecati na mikrostrukture izrađenih zidova (Slika 37). Ispitni uzorci su se izrezali na duljine od 30 mm, s time da je početak rezanja bio na udaljenosti 50 mm od početka zida zbog nestabilnosti električnog luka na početku svakog zavarivanja (Slika 38).



Slika 37. Odvajanje izrađenih zidova od osnovne ploče plazma rezačicom



Slika 38. Uzorci izrezani tračnom pilom uz ostatak izrađenih zidova

Nakon rezanja slijedilo je ručno grubo brušenje brusnim papirom smanjujući veličinu zrnatosti i to redom: P100, P150, P240, P400 i P500.



Slika 39. Brusni papiri različite zrnatosti i ručno izbrušeni uzorak 1.

Nastavak brušenja uzoraka proveden je u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju Phoenix Alpha Grinder Polisher (Slika 40). Fino brušenje provedeno je sljedećim brusnim papirima: P320, P500, P1000, P2400 i P4000. Brzina brušenja je bila 300 okretaja/min za sve hrapavosti brusnog papira. Tijekom svih faza finog brušenja korištena je voda kao rashladno sredstvo.



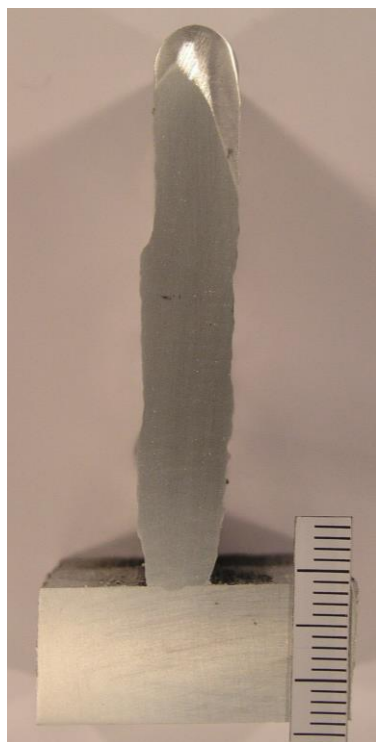
Slika 40. Uređaj za fino poliranje – Phoenix Alpha Grinder Polisher

Za daljnju makrostrukturnu analizu uzorci su nagriženi u otopini za nagrizanje u trajanju od 20 sekundi, zatim su uronjeni u vodu kako bi se prekinula kemijska reakcija i naposljetku isprani uranjanjem u alkohol (Slika 41).

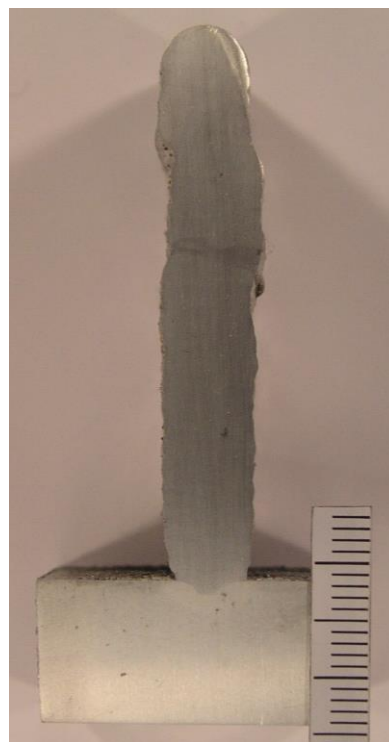


Slika 41. Nagrizanje uzoraka

Makroskopskom analizom uzoraka nisu uočene veće nepravilnosti i poroznosti. Uočena je mala penetracija u osnovnoj ploči te linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala (Slika 42 i 43). Također, na slikama se mogu primijetiti sitne crne točke, koje su najvjerojatnije nastale nedovoljnim mehaničkim čišćenjem navara nakon svakog nanešenog prolaza.



Slika 42. Makroizbrusak uzorka 1.

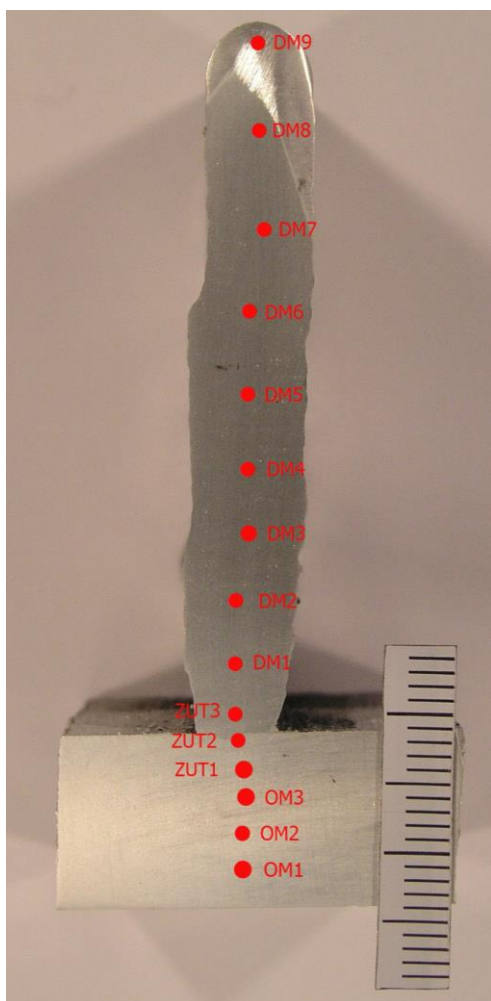


Slika 43. Makroizbrusak uzorka 2.

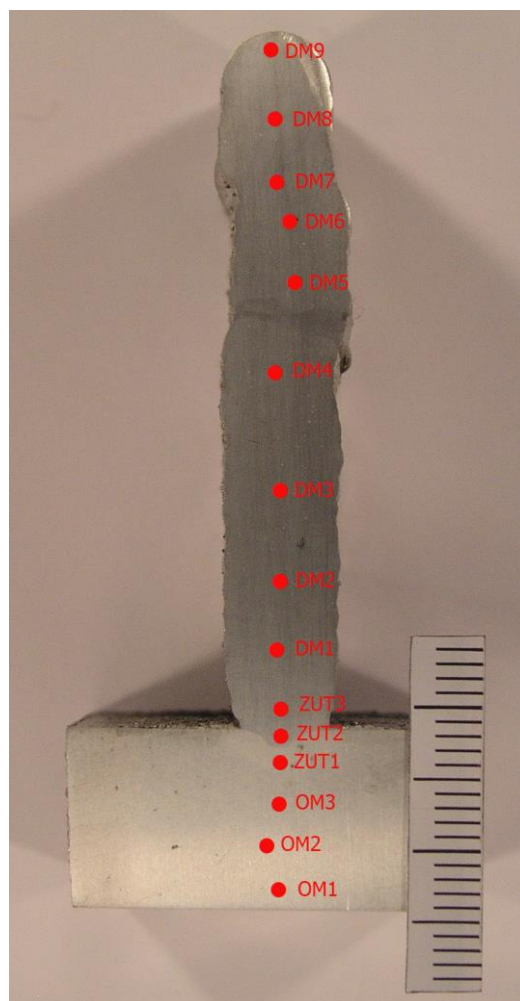
4.6. Mjerenje tvrdoće

U svrhu analize utjecaja parametara zavarivanja i relativne usporedbe dva izrađena zida provedeno je ispitivanje tvrdoće HV5 po Vickersu. Iako ova metoda nije namijenjena za mjerenje tvrdoće aluminijskih legura, zbog nedostatka uređaja za provedbu predviđenih metoda mjerenja tvrdoće aluminija ispitivanje je provedeno na tvrdomjeru REICHTER. Tvrdoća je ispitana u osnovnom materijalu (3 točke), zoni utjecaja topline (3 točke) te dodatnom materijalu po vertikalnoj liniji u razmacima od 5 mm (9 točaka). Na svakom uzorku provedeno je 15 mjerenja, a točke u kojima se mjerila tvrdoća označene su na slikama 44 i 45. Tablica 19 prikazuje dobivene vrijednosti mjerenja za oba uzorka.

Oznake ucrtane na slikama označuju zone u zavarenom spoju, gdje je: OM – osnovni materijal, ZUT – zona utjecaja topline, DM – dodatni materijal.



Slika 44. Područja mjerenja tvrdoće uzorka 1

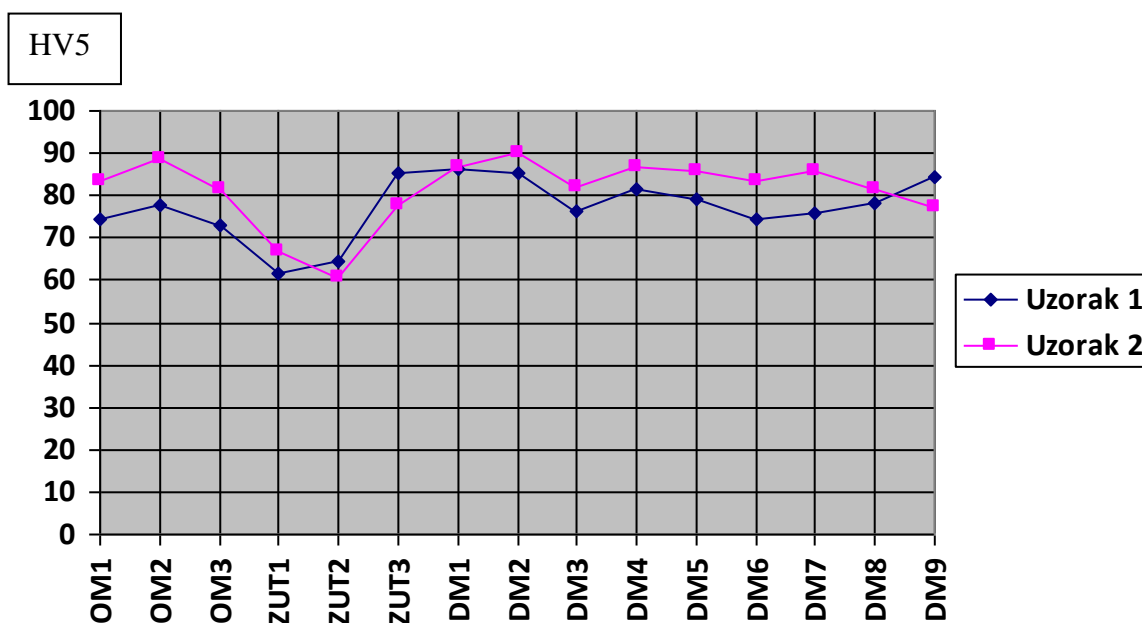


Slika 45. Područja mjerenja tvrdoće uzorka 2

Tablica 19. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV5

Uzorak	OM1	OM2	OM3	ZUT1	ZUT2	ZUT3	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9
1	74,4	77,5	73,2	61,6	64,4	85,2	86,2	85,2	76,1	81,6	79,3	74,2	75,8	78,4	84,2
2	83,4	88,7	81,7	66,8	60,5	77,7	86,7	90,0	82,1	86,7	85,7	83,6	85,7	81,6	77,2

Dobiveni podaci pokazuju da su najniže vrijednosti tvrdoće u zonama utjecaja topline, dok se najviše postižu u završnim prolazima dodatnog materijala. Razlog oscilacija tvrdoća su različiti intenziteti hlađenja u ZUT-u koji povezuje dodatni materijala s osnovnim. U dodatnom materijalu tvrdoće su ujednačene, unatoč nejednolikim širinama (pogreškama oblika) koje su nastale kao rezultat aditivne proizvodnje. Grafički prikaz tvrdoće oba uzorka prikazan je slikom 46.



Slika 46. Tvrdoća HV5 oba uzorka

Iz grafičkog prikaza može se zaključiti kako su tvrdoće oba zida približne i kako nema većih odstupanja, osim pada tvrdoće u zoni utjecaja topline što je karakteristična pojava za ljevačku strukturu aluminija. Razlog jednolikog rasporeda tvrdoće u dodanom materijalu (području zida) je izrada sloj po sloj koja je dovela do ravnomjernog hlađenja svakog među sloja.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu, određeni su optimalni parametri za aditivnu proizvodnju legure AlMg električnim lukom i žicom pri čemu su izrađena dva zida. Unatoč različitim parametrima zavarivanja i problema uzrokovanih korištenjem aluminijske legure kao dodatnog materijala, postigle su se željene dimenzije. WAAM postupak dokazao se kao efikasan i ekonomičan postupak koji može zamijeniti klasične metode izrade dijelova (kovanje, strojna obrada) u raznim područjima proizvodnje, a posebice gdje se koriste skupi materijali. Kao postupak zavarivanja pri korištenju aluminijskih legura preporučuje se robotizirani MIG postupak zavarivanja jer omogućuje kontrolirani prijenos metala sa elektrode na radni komad uz optimalne mehaničke i strukturne karakteristike nanesenih slojeva.

Na temelju provedenog eksperimenta može se zaključiti sljedeće:

- Aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom moguće je izraditi zid visine 50 mm legurom AlMg uz različite parametre zavarivanja.
- Legura AlMg pokazala je dobru zavarljivost, no uz pravilno korištenje (potreban je što kraći polikabel, dobri parametri zavarivanja, korištenje *push – pull* pištolja za zavarivanje...)
- MIG impulsni postupak zavarivanja pogodan je za zavarivanje metala osjetljivih na unos topline, kao što je aluminij.
- Impulsno MIG zavarivanje svojom promjenom jakosti struje može osigurati dobro otplinjavanje vodika iz zavara, uz odgovarajuću brzinu zavarivanja.
- Brzina zavarivanja utječe na širinu zida, što je brzina zavarivanja veća, manji je unos topline, manje je taline u području zavara, pa je i manja širina zida.
- Razlog ujednačene tvrdoće u području zidova je prisutnost sitnozrnate strukture zbog normalizacije koja se događa prilikom zavarivanja sloj po sloj.
- Promatrajući izrađene zidove, vidljivo je da širine zidova osciliraju te je potrebna naknadna strojna obrada kako bi dobili primjenjiv proizvod bez razlika u dimenzijama.
- Kao zaštitni plin nužno je koristiti argon visoke čistoće jer omogućuje uspostavu električnog luka bez rasprskavanja i pruža dobar efekt čišćenja.

- Prilikom izrade WAAM zidova postiže se bolja ujednačenost visina ako se zavaruje s obje strane, jedan prolaz s lijeva, drugi s desna i obrnuto.

Primijenjena tehnologija dala je optimalne rezultate. Daljnja istraživanja usmjeravaju se na izradu dijelova složenije geometrije, ali uz prilagodbu sustava dobave žice i primjenu valjanja nakon svakog prolaza kako bi se dobila ujednačenija geometrija izrađenih dijelova.

LITERATURA

- [1] Habuš, S., Stričević, D., Tomašić, V.: Anorganska kemija, Profil, Zagreb, 2013.
- [2] Tehnička enciklopedija br.1, JLS, Zagreb, 1988.
- [3] Kovačević, Lj., Žugaj, I.: Kemijski elementi, Media SCI, Zagreb, 1996.
- [4] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2013.
- [5] http://transport.world-aluminium.org/fileadmin/_migrated/pics/127236057203.jpg, dostupno 18.02.2018.
- [6] http://www.aluinfo.de/files/_media/bilder/1_Bilderpool/Teaserbox_640x640/Verpackung/Alu-Dosen_1_640x640.jpg, dostupno 18.02.2018.
- [7] Davis, J.R.: Aluminium and Aluminium Alloys, ASM International, 1993.
- [8] Sheasby, P.G., Pinner Herold, R.: The Surface Treatment and Finishing of Aluminium and Its Alloys, ASM International, 2001.
- [9] Kovačević B., Živčić M.: Zavarivanje aluminijских materijala: Znanstveno stručni časopis Zavarivanje, br 3/4 , 2013.
- [10] Više autora: ASM Handbook, Volume 2 – Properties and Selection: Nonferrous alloys and special – purpose materials, ASM International, 1992.
- [11] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1426843813-0-im_oznacivanje-al.ppt, dostupno 18.02.2018.
- [12] Fuertes, J.P., Murillo O., Salcedo, D.I.: Mechanical Properties Analysis of an Al-Mg Alloy Connecting Rod with Submicrometric Structure, Procedia Engineering, Elsevier, 2015.
- [13] Mathers, G., The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002.
- [14] https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf, dostupno 18.02.2018.
- [15] Anzulović, B.: Zavarljivost i pravilo odlučivanja u zavarivanju, Zavarivanje 21 (1978) 3 ; originalni tekst: F. V. Gatto: „Weldability and Sound Welding Decisions“, Welding Journal“ br. 3/78
- [16] Garašić I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [17] Lukačević, Z.: Zavarivanje, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1998.

- [18] Kralj, S., Kožuh, Z., Andrić, Š.: Zavarivački i srodni postupci, Priručnik, Zagreb, 2015.
- [19] Andrić, Š.: Zavarljivost aluminija i Al - legura; Zagreb, 18.05.2006.
- [20] Garašić, I.: Tema 2.23: Zavarljivost aluminija i aluminijskih legura, Predavanja iz kolegija Zavarljivost materijala, FSB, Zagreb.
- [21] Kralj, S., Andrić, Š.: Savjetovanje, Zavarene aluminijske konstrukcije, Zavarivanje i zavarljivost aluminijskih legura, Šibenik, 1990.
- [22] Juraga, I., Ljubić, K., Tivić, M.: Pogreške u zavarenim spojevima, Zagreb, 2007.
- [23] Priručnik Hobart Guide for Aluminium Welding
- [24] O'Brien, A.: Welding handbook, 9th edition (Volume 2), Welding processes and American Welding Society, Miami, USA, 2004.
- [25] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt, dostupno 18.02.2018.
- [26] Brezetić, J.: Tehnologija II- Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje
- [27] Miller, D.: Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), USA, 2012.
- [28] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1465220879-0-strojeviopremazazavarivanje_prirucnik_rev.2016_final.pdf, dostupno 18.02.2018.
- [29] Gojić, M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [30] Rudan, M.: 5. Seminar DTZI, MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova, Pula, 2008.
- [31] [http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases .pdf](http://lindeplin.hr/dat/shieldinggases.pdf) , dostupno 18.2.2018.
- [32] Godec D., Šercer M.: Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [33] Weller C., Kleer R., Piller F.T., Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, International Journal of Production Economics, 43-56, 2015.
- [34] Martina F., Williams S.: Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison, Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.
- [35] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 465-481, 2015.

- [36] J. Donoghue, A.A. Antonysamy, F.Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B.Prangnell; "The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V"; ELSEVIER; 2016.
- [37] Williams S.: WAAMMat, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2016
- [38] http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/vs_eng/vps-4000-digit-eng.html, dostupno 18.02.2018.
- [39] <https://www.probe.hr/proizvod/zica-ez-mig-almg-5-12-mm7-kg/>,dostupno 18.02.2018.
- [40] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.

